

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA STROJNÍ



KATEDRA STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
ODDĚLENÍ STROJÍRENSKÉ METALURGIE

Studijní program M 2301 Strojní inženýrství
Studijní obor 2303T002 Strojírenská technologie

Zaměření
Strojírenská metalurgie

**Zajištění dlouhodobého a pravidelného účinku očkování z indukčního
předpecí ABE ve slévárně Ferex - Castings s.r.o**

**Providing long-lasting vaccination effect from the induction casting
forebay Realistic ABE in Ferex – Castings Foundry, Ltd.**

Michaela K r e š l o v á

KSP – SM – 542

Vedoucí práce: prof. Ing. Iva Nová, CSc.

Vedoucí katedry: prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld

Rozsah práce a příloh:

Počet stran: 58

Počet obrázků: 32

Počet grafů: 3

Počet tabulek: 3

23.5. 2008

Stránka pro originál zadání dipl.práce

A N O T A C E

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie Oddělení strojírenské metalurgie

| | |
|-------------------|---|
| Studijní program: | M2301 – Strojní inženýrství |
| Diplomant: | Michaela Krešlová |
| Téma práce: | Zajištění dlouhodobého a pravidelného účinku očkování z indukčního předpecí ABE ve slévárně Ferex - Castings s.r.o. Providing long-lasting vaccination effect from the induction casting forebay Realistic ABE in Ferex – Castings Foundry, Ltd. |
| Číslo DP: | KSP-SM- 532 |
| Vedoucí DP: | Prof. Ing. Iva Nová, CSc. |

Abstrakt: Tato práce se zabývá stanovením závislosti mechanických vlastností odlitků z litiny s lupínkovým grafitem na chemickém složení a účinku očkovacích bloků Optigran ve slévárně Ferex castings s.r.o., Liberec. Hodnocené mechanické vlastnosti byly mez pevnosti v tahu R_m a tvrdost podle Brinella HB na zkušebních tyčích průměru 30 mm, a zkušebních tělesech – desek o rozměrech 160 x 40 x 5 (10, 15, 20) mm.

Abstract: The diploma thesis deals with the assesment of mechanical parameters dependence of lamellar graphite cast iron castings on the charge composition in the induction casting forebay Realistic ABE. The chemical analysis of the charge referring to the different ratio of the charging stock was carried out. The assessed mechanical parameters concerned tensile strength limit R_m and Brinell hardness on test specimen with the diameter of 30mm.

Prohlášení

Byla jsem seznámena s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména paragraf 60 - školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce.

V Liberci :

.....

Michaela Krešlová

PODĚKOVÁNÍ

Touto cestou děkuji vedoucí své diplomové práce prof. Ing. Ivě Nové, CSc. za odborné vedení a cenné rady při řešení práce. Děkuji také Ing. Šlahorovi za konzultace a podnětné připomínky.

Seznam použitých zkratk a symbolů:

| | |
|-------------------|---|
| CE | - uhlíkový ekvivalent |
| CEL | - likvidus – uhlíkový ekvivalent |
| HB | - tvrdost dle Brinella |
| LLG | - litina s lupínkovitým grafitem |
| LKG | - litina s kuličkovým grafitem |
| LČG | - litina s červíkovým grafitem |
| Re | - mez kluzu v tahu [MPa] |
| Rm | - mez pevnosti v tahu [MPa] |
| Rmo | - mez pevnosti v ohybu [MPa] |
| Rp _{0,2} | - smluvní mez kluzu v tahu [MPa] |
| Rpd | - smluvní mez kluzu v tlaku [MPa] |
| RH | - stupeň zralosti |
| RG | - relativní tvrdost |
| ρ | - hustota, měrná hmotnost [kg·m ⁻³] |
| Qi | - index jakosti |
| S _E | - stupeň eutektičnosti |

OBSAH

| | |
|--|----|
| 1. ÚVOD | 8 |
| 2. TEORETICKÁ ČÁST PRÁCE | 10 |
| 2.1 Charakteristika litin | 10 |
| 2.1.1 Rozdělení litin | 10 |
| 2.1.2 Struktura litin | 11 |
| 2.1.3 Litina s kuličkovým grafitem | 11 |
| 2.1.4 Litina s červíkovitým grafitem | 12 |
| 2.1.5 Litina s lupínkovým grafitem | 12 |
| 2.2 Vliv podmínek na výrobu LLG | 21 |
| 2.3 Vliv očkovaní na krystalizaci litin | 22 |
| 2.4 Hodnocení mechanických vlastností litin..... | 27 |
| 2.5 Tavicí zařízení pro výrobu litiny s lupínkovým grafitem..... | 31 |
| 3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE | 38 |
| 3.1 Charakteristika přípravy taveniny ve slévárně Ferex-castings s.r.o. | 38 |
| 3.1.1 Metody kontroly kvality taveniny litiny..... | 40 |
| 3.1.2 Zkouška tahem | 40 |
| 3.1.3 Zkouška tvrdosti podle Brinella..... | 42 |
| 3.2 Výroba forem pro odlitky skříně elektromotoru..... | 44 |
| 3.3 Výroba odlitků skříně elektromotoru | 45 |
| 3.3.1 Metalografické hodnocení rozložení grafitu skříně elektromotoru | 46 |
| 3.4 Návrh a provádění experimentů se změnou očkovačla..... | 51 |
| 4. DISKUSE VÝSLEDKŮ | 54 |
| 5. ZÁVĚR | 56 |

PŘÍLOHY

1. ÚVOD

Snahou metalurga, je především výroba kvalitních odlitků s dosažením požadované struktury materiálu v různých tloušťkách stěn odlitku a tím i zajištění očekávaných mechanických vlastností materiálu.

Ke splnění tohoto úkolu je nutná kontrola jakosti taveniny popřípadě úprava jakosti taveniny ještě před odlitím do formy. Význam kontroly jakosti i výroby odlitků s předem stanovenými vlastnostmi vzrůstá v závislosti na zvyšujících se cenách energie, surovin, opatřeních na ochranu životního prostředí a udržení konkurenceschopnosti výrobků. Slévárenství je technologií, jejíž teoretické základy se odvozují z různých základních věd, proto zvládnutí problému jakosti a kvality odlitků není jednoduché. K ovládnutí jakosti je třeba zvládnout procesy tuhnutí a krystalizace odlitků, zpracování tekutého kovu, kontrolu a měření při jednotlivých technologických procesech.

Litina s lupínkovým grafitem je již dlouhou dobu známý a používaný materiál pro výrobu různých typů odlitků. Jakost taveniny, daná chemickým složením, způsobem tavení a odléváním neovlivňuje pouze strukturu litiny v odlitku, ale také mechanické a užitné vlastnosti, a samozřejmě i sklon litiny k tvorbě různých druhů vad (např. tvorba zákalky v tenkých stěnách a hranách, ředin, zapečenin, staženin...), které velmi často předurčují další použití odlitků.

Předurčení skutečných vlastností litiny s lupínkovým grafitem v odlitku je i při současných znalostech obtížné. Možné příčiny vzniku anomálních struktur i různých druhů vad jsou sice v odborné literatuře dostatečně popsány, ale v praxi je stále obtížné tyto problémy řešit.

Dosahování vysoké a rovnoměrné jakosti výrobků v našich podmínkách není plně oceněno. Zvlášť obtížná je situace ve slévárnách, z nichž se požadují vysoce jakostní odlitky, ale zároveň předpokládá, že tyto jakostní odlitky lze vyrobit z horších

vsázkových surovin, na zastaralých a obtížně kontrolovatelných tavících pecích. Dosažení vysokých parametrů jakosti materiálu v odlitcích předpokládá jakostní vsázkové suroviny předem známého chemického složení, kontrolu tavícího procesu, úpravu taveniny i způsob odlévání.

Cílem této práce je shrnout současnou úroveň znalostí o možnostech zajištění dlouhodobého očkovacího účinku a na základě vyhodnocení získaných údajů navrhnout optimální způsob úpravy taveniny očkovaním před odlitím do dutiny formy.

V rámci této práce bude proto věnována pozornost těmto otázkám:

Úpravě taveniny litiny s lupínkovým grafitem

Způsob hodnocení jakosti litiny s lupínkovým grafitem

Porovnání očkovacích účinků vybraného typu očkovačla pro odlitky namáhané otěrem (např. brzdové bubny) a pro odlitky namáhané dynamicky (např. odlitky skříní elektromotorů), a posouzení vlivu použitého očkovačla na výslednou strukturu a mechanické vlastnosti. Zhodnocení dosažených výsledků a návrhu optimálního řešení pro zajištění požadované struktury a mechanických vlastností v kritickém průřezu u dynamicky namáhaných odlitků pro automobilový průmysl.

Tato práce je součástí metalurgického vývoje výroby odlitků ve slévárně Ferex-castings s.r.o., Liberec. Jejím cílem je ověření účinku vybraných očkovačel na mechanické vlastnosti odlitků brzdových bubnů z litiny s lupínkovým grafitem EN a odlitků skříní převodu ozn. F432-4-03, F432-4-04, F432-4-014 litých z LLG EN

Porovnání získaných výsledků umožní posouzení stávající úrovně očkovacího účinku očkovačel používaných ve slévárně Ferex castings s.r.o., Liberec, případně navrhnout dokonalejší způsob očkování šedé litiny s ohledem na požadované mechanické vlastnosti a hospodárnost výroby.

2. TEORETICKÁ ČÁST PRÁCE

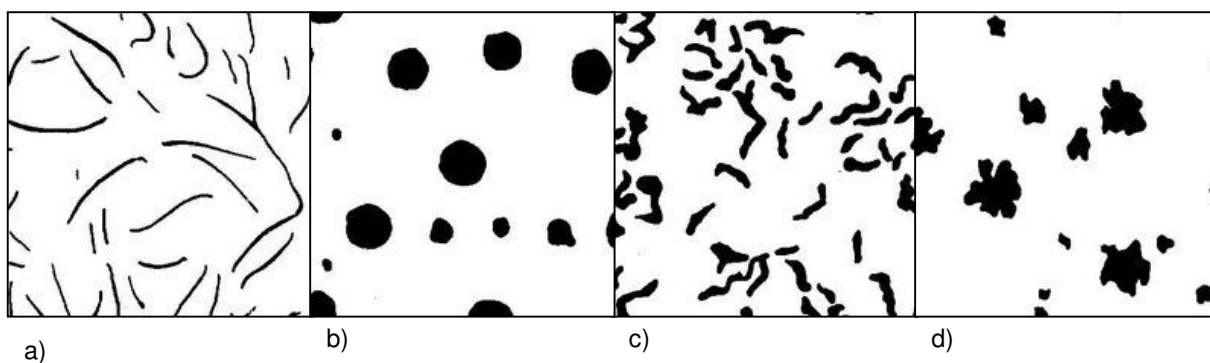
2.1 Charakteristika litin

Litiny tvoří nejvýznamnější skupinu slévárenských slitin. Definujeme je jako slitiny železa s uhlíkem, křemíkem a dalšími přísadovými prvky v nichž obsah uhlíku převyšuje maximální rozpustnost v austenitu 2,14 % bez vlivu dalších prvků. Jsou to slitiny, které mají ve struktuře eutektikum. Uhlík může být v litinách vyloučen v podobě grafitu, pak těmto litinám říkáme litiny grafitické. Nebo je uhlík vyloučen v podobě cementitu a v tomto případě jde o litiny bílé.

2.1.1 Rozdělení litin

Základním determinantem určujícím druh litiny je tvar vyloučeného grafitu. Podle tvaru vyloučeného grafitu dělíme litiny na tyto typy, viz obr.1:

- a) litina s lupínkovým grafitem
- b) litina s kuličkovým grafitem
- c) litina s červíkovitým grafitem
- d) temperovaná litina



Obr. 2 -1 Schéma základních typů grafitu v litinách [2]

Litiny s lupínkovým, kuličkovým i červíkovitým grafitem tuhnou dle stabilní soustavy, kde grafit krystalizuje při tuhnutí eutektika. Oproti litině s kuličkovým

a červíkovitým grafitem, které je nutné modifikovat, vzniká lupínkový grafit v litině bez metalurgických zásahů.

Temperovaná litina tuhne podle soustavy metastabilní, eutektikem je zde ledeburit a vločkový grafit ve struktuře vzniká až následným tepelným zpracováním (temperováním).

2.1.2 Struktura litin

Litiny jsou tvořeny grafitem a základní kovovou hmotou (matricí). Grafit je již krystalickou formou uhlíku. Krystalizuje v šesterečné soustavě, má velmi dobrou tepelnou vodivost, avšak pevnost a tvárnost jsou zanedbatelné.

Podle vzniku při grafitizaci – proces vedoucí ke vzniku stabilního grafitu, rozdělujeme grafit na tyto druhy:

eutektický – vzniká tuhnutím eutektika, s austenitem tvoří tzv. grafitické eutektikum

primární – vzniká jako primární fáze při tuhnutí nadeutktických grafitických litin, má tvar hrubých lupínků, tudíž má ve struktuře litin nepříznivý vliv na mechanické vlastnosti (grafit působí jako vrub). Další je grafit, který vzniká rozpadem metastabilních složek při tepelném zpracování.

Základní kovovou hmotu v nelegovaných litinách tvoří ferit, perlit popřípadě ledeburit. Různým tepelným zpracováním lze získat matici, která může obsahovat také austenit, martenzit, bainit i komplexní karbidy. U nelegovaných litin je základní kovová hmota nejčastěji tvořena feritem a perlitem. Dle převládající složky rozeznáváme strukturu feritickou, perlitickou a feriticko-perlitickou.

2.1.3 Litina s kuličkovým grafitem

Litina s kuličkovým grafitem (GJS), dříve nazývaná jako tvárná litina, je tvořena základní kovovou hmotou a grafitem, který je vyloučen ve tvaru kuliček. Vyloučení kuličkového grafitu se dosahuje modifikací litiny pomocí hořčíku. K dosažení tohoto tvaru grafitu je nutné, aby bylo v litině minimálně 0,025 % Mg. Částečně sferoidizační účinek mají i některé jiné prvky, např. Ca a další, jejich účinek je však nedostatečný a aplikace problematická. Hořčík je proto jediným technicky vhodným modifikačním prvkem. Grafit má být vyloučen jako dokonale kuličkový, jemný, rovnoměrně rozložený. Na mechanické vlastnosti nemá uhlíkový ekvivalent rozhodující vliv, u tohoto typu litiny jsou mechanické vlastnosti závislé především na struktuře základní kovové hmoty. Litiny s feritickou strukturou mají velmi dobré plastické a dynamické

vlastnosti, perlit v základní kovové hmotě způsobuje zvýšení pevnosti. Zvýšení podílu perlitu se dosáhne při vyšším obsahu manganu nebo pomocí legur stabilizujících perlit. Při výrobě litin s kuličkovým grafitem je nutné udržovat co nejmenší obsah fosforu a karbidotvorných prvků, popřípadě dalších nečistot, které vedou k významnému snížení plastických vlastností.

2.1.4 Litina s červíkovitým grafitem

Litina s červíkovitým grafitem (GJV) je slitina železa s uhlíkem, křemíkem, manganem a dalšími prvky, přičemž uhlík, který není vázán ve strukturních složkách základní kovové hmoty, je vyloučen jako grafit převážně červíkovitého tvaru. Má-li být použito nejvýhodnější kombinace vlastností litiny s červíkovitým grafitem je nutno se snažit dosáhnout pro většinu případů 80—90% červíkovitého grafitu ve struktuře a zbytek tvoří kuličkovitý grafit (žádný lupínkový grafit).

Struktura základní kovové hmoty litiny s červíkovitým grafitem může být tvořena feritem, a perlitem, bainitem, martenzitem nebo sorbitem. Volný cementit je ve struktuře nežádoucí. Pevnost v tahu se pohybuje v rozsahu 350 až 550 MPa v závislosti na uhlíkovém ekvivalentu, struktuře základní kovové hmoty, charakteru červíkovitého grafitu a rychlosti chlazení. Hodnoty meze kluzu leží v rozsahu 260 až 380 MPa [2].

2.1.5 Litina s lupínkovým grafitem

Litina s lupínkovým grafitem je charakterizována jako vícekomponentní podeutektická slitina železa, uhlíku, křemíku, fosforu, síry popřípadě ještě dalších prvků, přičemž obsah uhlíku je vyšší než maximální rozpustnost uhlíku v austenitu (2,11 % C při teplotě 1147°C), daná bodem E rovnovážného diagramu Fe – C. Vedle vyššího obsahu C mají i vyšší obsah příměsí a to zejména Si, Mn, než-li je tomu u oceli. K nejdůležitějším přísadám patří Si, pohybující se v rozmezí 0,3 až 4%, litiny proto bývají považovány za potrojně slitiny Fe-C-Si.

Strukturu litin ovlivňuje především chemické složení vsázky, rychlost tuhnutí a chlazení v závislosti na tloušťce stěny odlitku, typu formy, použitých jader. Dalším významným faktorem ovlivňujícím morfologii litin je vliv očkování a modifikace, teplota taveniny a také doba přehřátí taveniny.

Litina s lupínkovým grafitem krystalizuje ve stabilní soustavě Fe – C, která je popsána binárním rovnovážným diagramem. Protože však technická litina s lupínkovým grafitem obsahuje i jiné slitinové prvky než Fe a C, dochází ke změnám průběhu hranic

fázových přeměn a posuvu eutektického bodu, který ve stabilní soustavě Fe – C leží při koncentraci 4,26% C a teplotě 1154°C.

Pro vyjádření vlivu chemického složení na polohu eutektického bodu se užívá tzv. uhlíkový ekvivalent CE, který převádí obsah jednotlivých chemických prvků na obsah uhlíku:

$$CE = \%C + 0,3(\%Si + \%P) \quad (2.1)$$

Tento rovnovážný diagram se uplatňuje u slitin Fe s obsahem C více jak 2,11%, přičemž stabilní složkou je zde grafit .Dále se používá „likvidus-uhlíkový ekvivalent“ CEL, který můžeme určit z tepelné analýzy, tj. z křivky chladnutí:

$$CEL = \%C + \%Si/4 + \%P/2 \quad (2.2)$$

Mezi další kriteria hodnocení litin se řadí stupněm eutektičnosti S_C , kterým vyjadřujeme poměr celkově dosazovaného uhlíku v litině k eutektické koncentraci uhlíku ovlivněné dalšími prvky. Vztahem pro určení S_C se zabývalo mnoho výzkumníků, např. Collauda udává vztah:

$$S_C = \%C / (4,23 - 0,27\%P - 0,297\%Si) \quad (2.3)$$

Tento vztah má dle Neumana, Schencka, Pattersona tvar:

$$S_C = \%C / 4,26 - 0,31\%Si - 0,33\%P - 0,4\%S - 0,027\%Mn. \quad (2.4)$$

Nejpoužívanější, zjednodušený tvar pro určení stupně eutektičnosti je:

$$S_C = \%C / 4,26 - 1/3(\%Si + \%P), \quad (2.5)$$

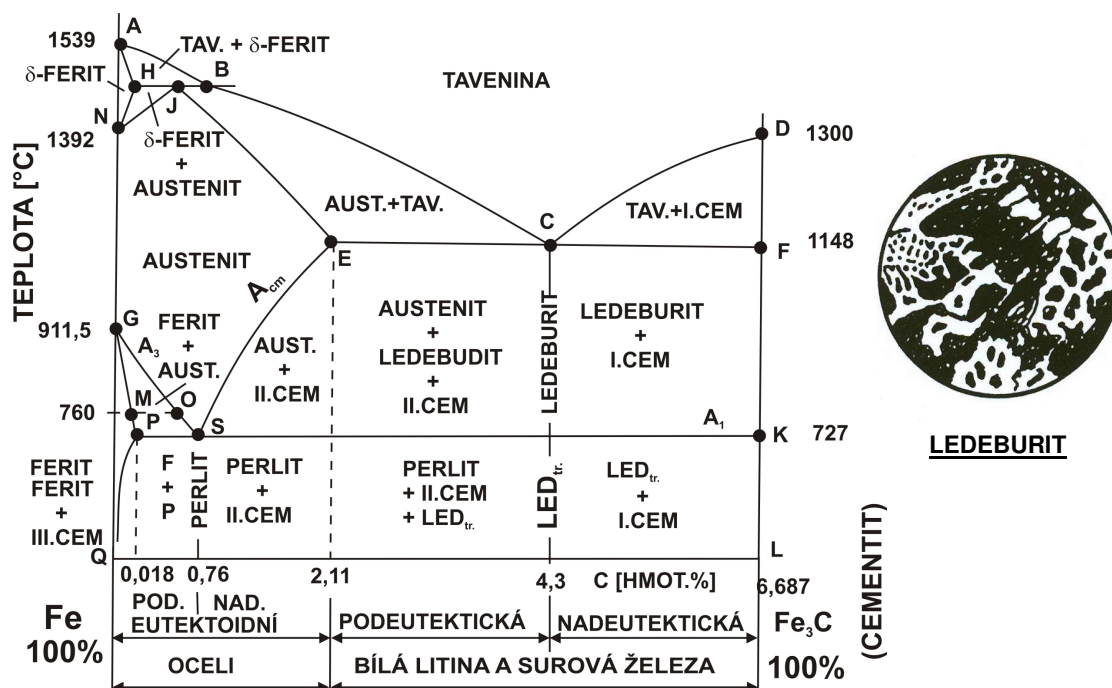
Dále platí, je-li:

$S_C = 1$, jedná se o litinu eutektického složení;

$S_C < 1$, jedná se o litinu podeutektického složení;

$S_C > 1$, jde o litinu nadeutektického složení.

Na obr. 2 - 2 je uveden rovnovážný diagram Fe-C metastabilní s vyznačením oblastí pro krystalizaci bílých litin.



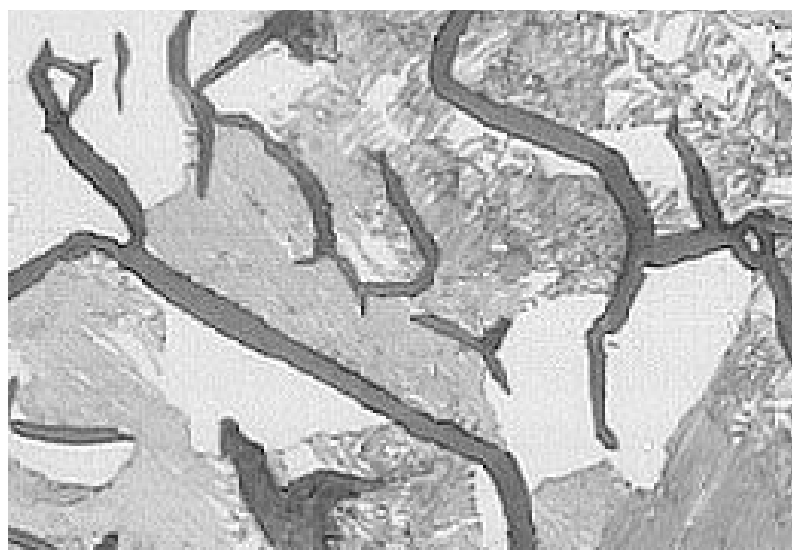
Obr. 2 – 2 Rovnovážný diagram Fe-C metastabilní

Pro určení polohy eutektického bodu je nutné stanovit teplotu likvidu T_l , kterou vyjádříme pomocí lineární závislosti T_l na chemickém složení litiny, vyjádřeným pomocí CEL. Pro podeutektické litiny platí:

$$T_l = 1669 - 124 \text{ CEL} \quad (2.6)$$

Krystalizací nazýváme přechod tekutého kovu do tuhého stavu. V tomto časovém úseku se vytváří struktura šedé litiny, která se vlivem překrystalizačních přeměn dále mění.

Litina s lupínkovým grafitem – LLG se dříve nazývaná jako šedá litina, obsahuje grafit ve tvaru prostorových útvarů, které se na metalografickém výbrusu jeví jako lupínky. Jejich délka je podstatně větší než-li jejich tloušťka, konec lupínků je ostrý. Oblast připadající jednomu prostorovému útvaru se nazývá eutektická buňka. Tento typ litiny je nejobvyklejším typem litiny. Na obr. 2-3 je uvedena ukázka struktury litiny s lupínkovým grafitem a feriticko-perlitickou matricí.



Nital

500 x

Obr. 2 – 3 Struktura litiny s lupínkovým grafitem a feriticko-perlitickou matricí

Tuhnutí litiny podeutektického složení začíná tvorbou primárního austenitu v podobě dendritů a při dosažení eutektické teploty začíná tuhnutí primárního grafitu ve tvaru lupínků, které vlivem nízké hustoty vyplouvají do horních částí odlitku v masivních částech tvoří tzv. grafitovou pěnu. V obou případech se složení zbytku taveniny blíží eutektické koncentraci a tuhnutí končí vznikem grafitického eutektika.

Při eutektické krystalizaci šedé litiny je vedoucí fází grafit. Jeho zárodky se mohou tvořit přímo v tavenině nebo na povrchu již přítomných krystalů austenitu. Krystalizací grafitu je tavenina ochuzována o uhlík a tím v jeho okolí vznikají příznivé podmínky pro růst austenitu. Na počátku krystalizace jsou zárodky kulové. Zárodky jsou obkloповány ze všech stran austenitem, který ztěžuje difuzi uhlíku z taveniny a tím brzdí růst zárodku v příčném směru a vzniká tak charakteristický tvar lupínkového grafitu.

Po skončení tuhnutí je struktura litiny s lupínkovým grafitem tvořena austenitem a grafitem. V případě vyšší rychlosti ochlazování může být výsledná struktura tvořena austenitem a směsí grafitu a cementitu, u bílé litiny je struktura tvořena austenitem a cementitem tuhnoucí dle metastabilní soustavy Fe – Fe₃C. Při dalším ochlazování se rozpustnost uhlíku v austenitu snižuje. Je-li ochlazování dostatečně pomalé vylučuje se

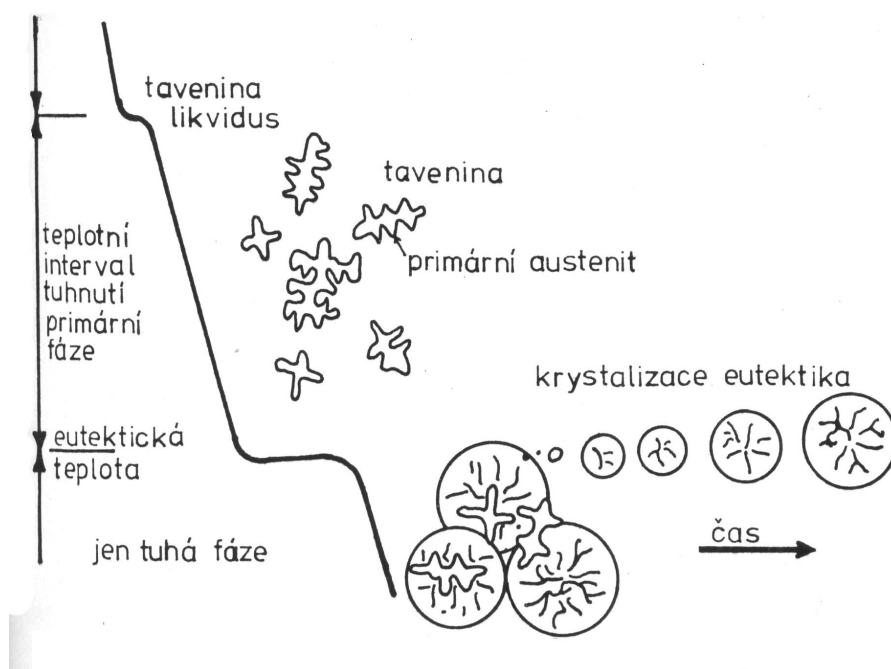
uhlík na již vytvořených částicích grafitu. V opačném případě se uhlík vylučuje ve formě cementitu na již existujících částicích cementitu nebo po hranicích zrn.

V eutektoidním intervalu dochází k rozpadu austenitu na grafitický eutektoid ferit (perlit) + grafit. K tomuto rozpadu však dochází pouze při vhodných podmínkách jako je vyšší obsah křemíku Si a pomalé ochlazování. Výsledná struktura šedých litin je pak tvořena perlitickou, feriticko-perlitickou, feritickou základní hmotou v níž jsou rozloženy částice grafitu.

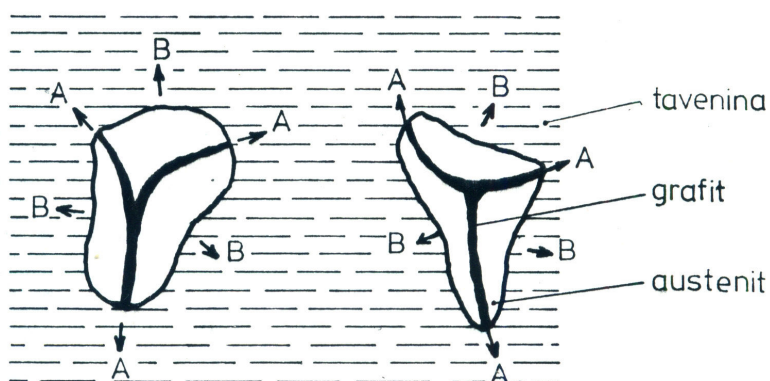
Mechanismus grafitzace - pro mechanismus tuhnutí litiny s lupínkovým grafitem byly vypracovány tři základní teorie o možnosti vzniku grafitu v soustavě Fe – C:

1. Eutektikum austenit → grafit se vytváří přímo z taveniny;
2. Z taveniny se tvoří eutektikum: cementit + austenit a grafit vzniká rozpadem cementitu;
3. Grafit se vylučuje z přesyceného roztoku uhlíku.

Za předpokladu platnosti první teorie, probíhá tuhnutí podeutektické litiny s lupínkovým grafitem tak, že mezi likvidem a eutektickou teplotou se tvoří primární krystaly austenitu, po dosažení eutektické teploty tuhne eutektikum austenit-grafit ve formě kulových zárodků, které nazýváme eutektickými buňkami. Po skončení procesu tuhnutí se austenitická základní hmota v dendritech a eutektiku spojí – viz. Obr. 2 – 4, který zobrazuje křivku tuhnutí LLG ve stabilní soustavě Fe-C.



Obr. 2 – 4 schéma krystalizace litiny s lupínkovým grafitem dle stabilní soustavy Fe-C. Mechanismus růstu grafitových lupínků je vysvětlován vznikem eutektických buněk, v nichž jsou zárodky grafitu obklopeny austenitickou obálkou bránící příčnému růstu grafitu. Volné konce lupínků jsou v neustálém styku s taveninou což umožňuje přednostní růst lupínků směrem k tavenině a tím jejich následné prodlužování. Lupínkový tvar lze rovněž vysvětlit tím, že atomy uhlíku se připojují k již existujícím základním rovinám krystalu. Grafit v litinách krystalizuje v šesterečné mřížce. Toto připojení je energeticky výhodnější než tvorba nových základních rovin. Svoji roli zde hraje i stupňovitý povrch krystalu. Jednotlivé stupně vytváří vhodné podmínky k upoutání dalších atomů a tím je způsoben růst krystalů ve směru základních rovin. Obr. 2 – 5 znázorňuje schéma růstu lupínku.



Obr. 2 – 5 schéma růstu lupínku

Protože austenit a grafit mají odlišné krystalové mřížky, rostou obě fáze samostatně a tím struktura nezíská typickou morfologii jakou má např. lamelární, globulární nebo tyčinkové eutektikum.

Velikost a množství lupínkového grafitu závisí i na velikosti eutektické buňky, ve které grafit vytváří spojitě rozvětvené útvary. Čím menší počet eutektických buněk, tím jsou tyto buňky větší a naopak čím je počet eutektických buněk vyšší, tím je grafit vyloučen v jemnější formě. Počet eutektických buněk narůstá:

- a) s vyšším stupněm přechlazení;
- b) s rostoucí rychlostí ochlazování (nižší lící teplota – menší tloušťky stěn odlitků);

c) očkovaním. Naopak, počet eutektických buněk se snižuje:

A) s rostoucí teplotou přehřátí taveniny v peci;

B) s rostoucí výdrží na vysoké teplotě.

Na velikost, množství a tvar vyloučeného grafitu má rozhodující vliv stupeň přechlazení taveniny, který je určen rozdílem rovnovážné a skutečné teploty krystalizace. Stupeň přechlazení se určuje chemickým složením a zpracováním taveniny v tekutém stavu (očkování), přehřátím taveniny a rychlostí chladnutí odlitku, která je dána druhem formy a tloušťkou stěn odlitku. Při nízkém stupni přechlazení vzniká poměrně hrubý a rovnoměrně rozložený lupínkový grafit. S rostoucím stupněm přechlazení se rovněž zvyšuje počet eutektických buněk, což se příznivě zjemněním částic grafitu. Při dalším zvyšování stupně přechlazení se rovnoměrné uspořádání částic grafitu mění na růžicovité až mezidendritické, kdy se grafit ukládá v prostorech mezi dendrity austenitu. V případě vzniku mezidendritického grafitu je vedoucí složkou při krystalizaci austenit. Tento typ grafitu je velmi nežádoucí protože je příčinou snížené pevnosti a nízké odolnosti proti opotřebení. Obr. 2 – 6 zobrazuje rozložení a typy grafitu.

Faktory ovlivňující krystalizaci litiny s lupínkovým grafitem

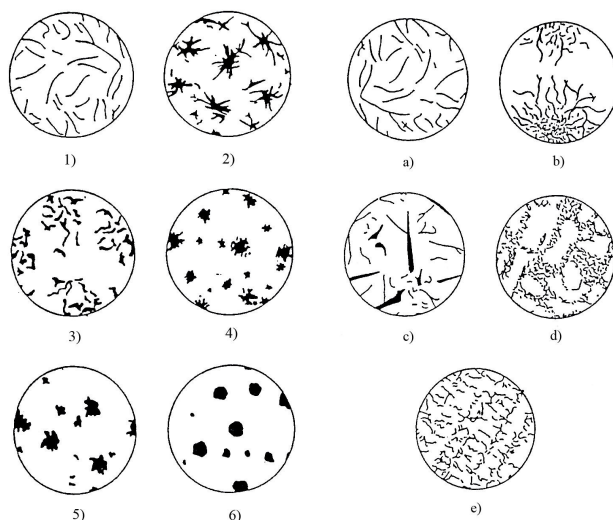
Podmínky krystalizace LLG jsou ovlivněny celou řadou faktorů. K těm nejdůležitějším patří:

a) chemické složení taveniny;

b) metalurgické podmínky při výrobě litiny;

c) rychlost ochlazování;

d) očkování.



- 1) lupínkovitý; 2) pavoučkovitý; 3) červíkovitý; 4) vločkový; 5) kuličkovitý pravidelně;
 6) kuličkovitý nepravidelně;
 a) rovnoměrné; b) růžicovitě; c) smíšené; d) mezidendritické neusměrněné;
 e) mezidendritické usměrněné

Obr. 2-6 Rozložení grafitu, typy grafitu.

Vliv chemického složení - ovlivňuje krystalizaci litiny s lupínkovým grafitem. Jednotlivé prvky vytvářejí řadu podle toho, zda grafitizaci podporují nebo jí zabraňují.

Al C Si Ti Ni Cu P Co Zr Nb W Mn Mo S Cr V Mg Ce B



Prvky, které leží uprostřed této řady jsou neutrální, vlevo leží prvky, které grafitizaci podporují, tavenina pak tuhne dle stabilní soustavy Fe – C. Prvky ležící vpravo grafitizaci potlačují a podporují tuhnutí v metastabilní soustavě Fe – Fe₃C. U litin běžných jakostí má na strukturu rozhodující vliv především množství uhlíku a křemíku. V další části práce je pro orientaci uveden i vliv dalších prvků.

Uhlík - výrazně ovlivňuje vlastnosti železa a je přítomen jako intersticiální (adiční) přísada nebo, při vyšší koncentraci, než je jeho rozpustnost v tuhém roztoku, tvoří se železem intersticiální chemickou sloučeninu -karbid železa Fe₃C nebo je chemicky volný a ve struktuře přítomen jako grafit. Ten krystalizuje v šesterečné soustavě s teplotou tání cca 37000 C, měrné hmotnosti 2,22x103 kg/m³ . Tvrdost a pevnost grafitu

jsou nízké. Při vyšším obsahu zlepšuje slévárenské vlastností a působí příznivě na grafitizaci.

Další přísadové prvky ovlivňují grafitizaci, to jest pochod vedoucí ke vzniku stabilního grafitu, podle toho, jakou mají afinitu k uhlíku a zda tvoří karbidy.

Křemík - je po uhlíku nejdůležitější přísada v litinách, kde výrazným způsobem modifikuje jejich vlastnosti. Je nekarbidotvorný prvek, který má tendenci se spíše rozpouštět ve feritu, kde nahrazuje atomy železa ve struktuře a je tudíž grafitotvorná přísada. Zlepšuje slévárenské vlastnosti, neboť snižuje teplotu tání litiny a zvyšuje tekutost, avšak zvětšuje sklon k tvorbě trhlin a ředin. Působí i jako deoxidizer. Navíc přítomnost Si zvyšuje pevnost matrice.

Si ovlivňuje i nukleaci v bainitické oblasti, kde působí na velikost zárodků redistribuci uhlíku během inkubační doby. S jeho vzrůstajícím obsahem klesá rozpustnost C v austenitu.

Měď - jako přísada zvyšuje tažnost po izotermickém zpracování za teplot 300 až 350 °C, avšak až při obsahu nad 3% Cu. Dále omezuje tvorbu bainitických karbidů, její ovlivnění zbytkového austenitu je zanedbatelné.

Síra - v litinách stabilizuje cementit, zvětšuje smrštění a zhoršuje homogenitu odlitků. Zvyšuje tvrdost a křehkost, způsobuje v litinách lámavost za tepla a proto se snažíme o její eliminaci. Nepříznivý vliv S lze kompenzovat její vazbou na MnS, přesto u litin dobré jakosti nemá její obsah přesahovat 0,1 %, u speciálních litin bývá jen 0,04 %.

Fosfor - stabilizuje cementit, zvětšuje interval tuhnutí a zlepšuje tekutost, proto pro některé speciální účely se používá až 2% P (umělecká nebo stavební litina).

Pevnost v tahu šedé litiny závisí na množství feritu v základní kovové matici a na tvaru grafitu a pohybuje se rozmezí 150 až 350 MPa. Litiny s větším podílem feritu a hrubšími lupínky mají nižší pevnost. Pevnost v tlaku je 450 až 1200 MPa.

Litina s lupínkovým grafitem je křehká, ve srovnání s ocelí nemá téměř žádnou tažnost, a nemá proto výraznou mez kluzu. Její soudržnost se poruší dříve, než je dosaženo trvalé deformace. Neplatí zde ani Hookův zákon o úměrném prodloužení při zatížení. Modul pružnosti se pohybuje u litiny s lupínkovým grafitem v rozmezí 60000 až 170000 MPa.

Předností litiny s lupínkovým grafitem je schopnost značného útlumu vibrací. Odlitky z LLG mají při stejném chemickém složení různé hodnoty mechanických vlastností u odlitků s různou tloušťkou stěn. To je způsobeno rozdílnými rychlostmi

chladnutí, následkem toho v tlustších stěnách, které chladnou pomaleji, vykrystaluje hrubší grafit než ve stěnách tenkých. Aby výsledná struktura, a tím i mechanické vlastnosti jednotlivých částí odlitku nebyly závislé na tloušťce stěn, a tím i rychlosti ochlazování, provádíme úpravu taveniny ještě před odlitím do formy tzv. očkováním.

2.2 Vliv podmínek na výrobu LLG

Fyzikální stav taveniny lze ovlivnit množstvím a druhem cizích zárodků, které způsobují tuhnutí a mají vliv na výslednou strukturu litiny s lupínkovým grafitem.

Ovlivnění zárodečného stavu v litině probíhá ve dvou stupních. V prvním stupni dochází ke zneškodnění nevhodných zárodků, které dávají podnět ke krystalizaci již při malém přechlazení a tím podporují vznik hrubého grafitu. Vyloučením nevhodných zárodků z procesu se umožní, při větším přechlazení, aktivace vyššího počtu jiných, mřížkově méně příbuzných zárodků.

Struktura litinových odlitků závisí i na původu surovin. V praxi se můžeme setkat s tím, že při změně vsázkových surovin se i při stejném složení litiny změní struktura i vlastnosti odlitků. Tento jev se označuje jako dědičnost. Dědičnost můžeme vysvětlit přítomností přímísenin prvků, jejich obsah nebývá při chemickém rozboru stanovován, a dále plynů a nekovových vměstků, jejichž množství je dáno původem vsázkových surovin.

Vliv rychlosti ochlazování – rychlost ochlazování v intervalu krystalizace a eutektoidní přeměny má spolu s chemickým složením rozhodující vliv na strukturu litinových odlitků. Rychlost ochlazování je dána:

- a) konstrukcí odlitku;
- b) lící teplota;
- c) fyzikálními vlastnostmi taveniny;
- d) fyzikálními vlastnostmi formy.

Závislost rychlosti ochlazování na konstrukci odlitku je poměrně složitá. Zjednodušeně je vyjádřena prostřednictvím modulu (redukované tloušťky) odlitku M , který je určován jako podíl objemu odlitku nebo jeho uvažované části k ochlazovanému povrchu odlitku nebo jeho uvažované části.

$$M = V / S, \quad (2.7)$$

kde značí: M – modul odlitku;

V – objem odlitku;

S – povrch odlitku.

S rostoucí hodnotou modulu M rychlost ochlazování klesá. Vliv lící teploty na krystalizaci je v souladu s jejím vlivem na rychlost ochlazování odlitků v kritickém intervalu. Snížením lící teploty se zvyšuje sklon tuhnutí podle metastabilního diagramu. Zvýšením lící teploty se zpomalí ochlazování, což má za následek hrubnutí zrn grafitu.

Z fyzikálních vlastností kovů má vliv na chladnutí především měrná tepelná kapacita C , součinitel teplotní vodivosti λ a hustota ρ . Litiny s vyšším obsahem uhlíku a křemíku chladnou pomaleji. Vyšší teplotní vodivost a nižší teplota formy popř. i zvýšená prodyšnost formy urychlují chladnutí odlitku a tím zvyšují sklon k tuhnutí dle metastabilní soustavy.

2.3 Vliv očkování na krystalizaci litin

Z teorie o krystalizaci víme, že tavenina krystalizuje snadněji, pokud obsahuje krystalizační zárodky. Z toho faktu vyplývá, že zvyšováním počtu krystalizačních zárodků se zvýší i počet vyloučených grafitových útvarů z taveniny, které jsou jemnější a rovnoměrněji rozptýlené.

Očkování je ovlivnění fyzikálního stavu taveniny za účelem dosažení lepších mechanických vlastností (tvrdost, pevnost) a snížení sklonu k tuhnutí dle metastabilní soustavy $Fe - Fe_3C$. Očkování provádíme přidáním malého množství grafitotvorných prvků (Si , C , Cu , atd..), a to buď přímo do taveniny na žlábků kuplovní, do pánve, případně do vtokové soustavy nebo metodou „in mould“ tzn., že očkovací látka je vkládána přímo do speciální komůrky umístěné ve formě. Důležitým faktorem ovlivňujícím účinek očkovadla je doba a přehřátí taveniny, proto se snažíme, aby se očkovadlo dostávalo co nejbližší k dutině formy. Očkování nám tedy příznivě ovlivní rozložení eutektických buněk a jejich krystalizačních center, které mají vliv na krystalizaci grafitu. Dochází ke změně vzdáleností krystalizačních center a současně k vybavování tepla vznikajícího během tuhnutí jednotlivých eutektických buněk. Tím je tavenina mezi eutektickými buňkami stále ohřívána a to tím více, čím více

krystalizačních center obsahuje. Toto mezikrystalické ohřátí taveniny vyvolává rovněž snížení rychlosti tuhnutí v naočkované litině a odstraňuje tím i nutnost přechlazení taveniny pro vznik krystalizačních zárodků. Zásady výroby kvalitní litiny s lupínkovým grafitem:

- a) volit chemické složení výchozí taveniny tak, aby litina ve směrodatné tloušťce stěny odlitku tuhla bez očkování makově až bíle;
- b) přehřátím výchozí taveniny odstranit endogenní zárodky a připravit tak podmínky k účinnému očkování;
- c) očkujícím efektem umožnit tvorbu vynucených zárodků, tím zmenšit vliv přechlazení a docílit vyloučení jemného, neorientovaného lupínkového grafitu. Chemické složení výchozí taveniny je charakterizováno nízkým stupněm eutektičnosti ($Sc > 1$). Chemické složení litiny vhodné k očkování se pohybuje v rozmezí: 2,6 a ž 3,2 % C; 1,2 až 1,5 % Si; 0,8 až 0,12 % Mn; max. 0,3 % P; max. 0,1 % S.

Odstraněním endogenních zárodků přehřátím výchozí taveniny ovlivníme rozměrovou závislost vyloučeného grafitu na přítomnost či nepřítomnost grafitotvorných zárodků a vměstků v tavenině, jako jsou např. MnS, FeO, MnO, SiO₂ a další. Pokud tyto zárodky neodstraníme rozpuštěním nebo odstátím při prodlouženém udržování taveniny na zvýšené teplotě, budou tyto složky při krystalizaci kovu ve formě působit jako krystalizační centra pro grafit. Ten se pak znovu vyloučí v původním množství a rozměrech ve tvaru lupínků. Přehřátí taveniny umožňuje odstranění původních center krystalizace grafitu a vnesení vyššího počtu nových zárodků za pomoci očkovacího prostředku. Realizace je vzhledem k optimálním teplotám přehřátí závislá na možnostech tavícího agregátu. Minimální teplota taveniny vhodná pro účinné očkování je 1360°C. Optimální teplota přehřátí taveniny je 1420°C. Odstátí se provádí po dobu 15 min s udržením teploty na 1420°C.

Očkující efekt je vyvolán přidáním očkovadel, tzn. látek, které vyvolávají, jako exogenní zárodky, grafitizaci za sníženého přechlazení. V praxi nejčastěji provádíme tyto způsoby očkování:

- a) vhazování očkovadla o zrnitosti 3 až 6mm do proudu taveniny kovu při odpichu na žlab tavící pece nebo lící pánve;
- b) injektováním práškového očkovadla do proudu taveniny kovu na lící jamce;
- c) umístěním kompaktních tělísek do vtokové soustavy formy.

Výzkum ukázal, že očkující efekt je nejúčinnější v čase 2 až 5 minut po naočkování, postupně slábne a mizí cca po 20 minutách. Tento jev nazýváme odeznívání očkujícího účinku.

Mechanismus očkování - mechanismus očkování je vysvětlován různými teoriemi, jako např. rafinační teorií, teoriemi vlivu na parametry krystalizace.

Podle rafinační teorie, dosahují částice zárodečné čistoty taveniny především odplyněním nebo desoxidací. Tím se zmenší stabilita karbidů z zvýší stupeň grafitizace. Ale jen teorie odplynění taveniny kovu nevysvětluje pomíjející účinek očkování. Teorie, která vysvětluje očkování jako důsledek desoxidace litiny je oslabena tím, že očkovací účinek samotného hliníku oproti vlivu ferosilicia nebo silikokalcia je menší, ačkoliv je hliník vzhledem ke své velké afinitě ke kyslíku energickým odkysličovadlem.

Teorie vlivu na parametry krystalizace vysvětlují očkování jako tvoření vynucených zárodků, vznikajících nerovnoměrným rozdělením prvků v mikroskopických objemech a jejich působením na podmínky grafitizace. Tyto teorie jsou založeny na místním dočasném přesycení taveniny uhlíkem. Pokud používáme grafitizační prvky jako očkovadla je každé z vnášených zrn do tekutého kovu zárodkem vzniku slitin a koncentrací očkujícího prvku až po střední obsah očkované litiny. Tyto prvky snižují hranici rozpustnosti uhlíku, ten se vylučuje a tvoří krystalizační zárodky grafitu. Shrňme-li poznatky ze všech očkovacích teorií můžeme posuzovat jednotlivá očkovadla z hlediska :

- a) složení očkovadla;
- b) krystalické příbuznosti ke grafitu;
- c) poměru tavicí teploty očkovadla k teplotě taveniny při očkování.

Kritérium účinnosti očkovadla je přechlazení, při kterém se očkovadlem vytvářejí vhodné zárodky pro krystalizaci grafitu.

Cílem očkování je dosažení co nejvhodnější struktury litiny s rovnoměrně rozloženým lupínkovým grafitem typu A, bez určité orientace, se základní kovovou hmotou perlitickou popřípadě perliticko-feritickou.

Typy očkovadel - během mnohaletého vývoje očkujících přísad se uplatňují tři hlavní skupiny grafitizačních očkovadel při očkování na žlábků nebo do pánve:

- a) očkovadla na bázi uhlíku;
- b) očkovadla na bázi křemíku;
- c) očkovadla na bázi mědi.

Očkovadla na bázi uhlíku - vývojem a použitím těchto očkovadel se prezentuje firma FOSECO, především svými produkty Inoculin 10 a Inoculin 12, které obsahují 40 – 50% grafitu. Na našem trhu se objevuje obdoba těchto očkovadel, pod názvem Gramod 30. Toto komplexní očkovadlo obsahuje 30-32% uhlíku, 45% křemíku a dalších prvků při zrnitosti 3mm. Očkovadla Inoculin i Gramod je nutné přidávat při vyšších teplotách (1360°C-1400°C). Jejich účinek je patrný zejména při odlévání odlitků s malou tloušťkou stěn, kde tato očkovadla mají vynikající vliv na potlačení zákalky (2x účinnější než FeSi), sklonu ke vzniku feritické základní kovové hmoty a podporují krystalizaci jemného grafitu typu – A.

Očkovadla na bázi křemíku – jsou FeSi a SiCa jsou nejstarší používané slitiny k očkovaní. Dnes nejpoužívanějším typem je očkovadlo FeSi 75. Ve snaze o zvýšení a prodloužení očkovacího účinku byly vyvinuty slitiny FeSi 75 s přídavkem hliníku (> 2% Al) a vápníku (cca 0,5 – 1% Ca), popřípadě dalších desoxidčních prvků jako je např. bariem, stroncium, zirkon nebo kovy vzácných zemin. Kromě FeSi 75 lze očkovat také s FeSi 65 pokud obsahují potřebná množství Al a Ca.

Další vývoj očkovadel a přísad na bázi křemíku nás vede ke komplexním (víceprvkovým) přísadám, jež obsahují kromě výše zmíněných prvků ještě další prvky převážně stabilizačního charakteru – např. Mn, Ti, Cr, V, Mo, Te. Při použití těchto očkovadel dosahujeme nejen snížení sklonu litiny k zákalkce, ale rovněž zvýšíme mechanické vlastnosti – pevnost, modul pružnosti.

Očkovadla na bázi mědi - tato očkovadla v naší slévárenské praxi téměř nevyužívají. Jsou založena na příznivém účinku mědi v kombinaci s vápníkem, popř. křemíkem.

Základní změny, po naočkování litiny

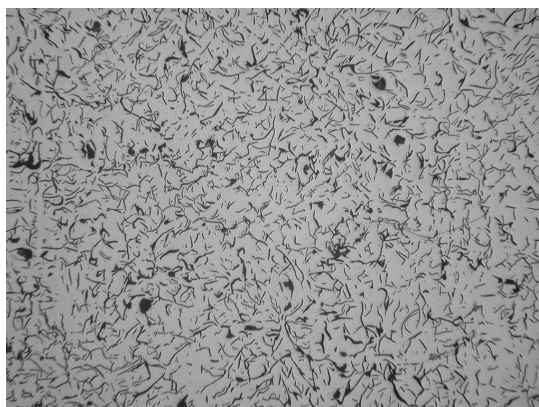
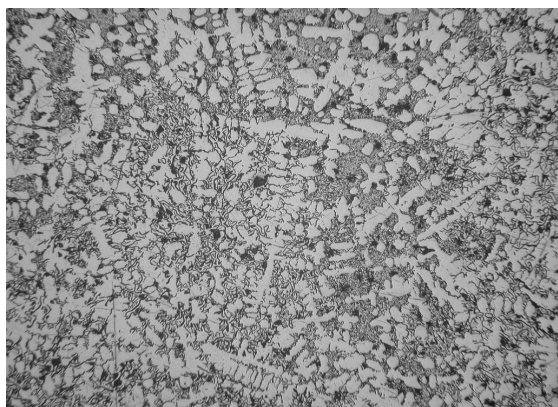
Mezi základní změny po očkovaní taveniny litiny se řadí:

1) Zvýšení počtu krystalizačních center eutektických buněk, na nichž závisí výšení počtu zárodků grafitu a eliminace hrubých lupínků grafitu. Výsledkem očkování je pak jemnější tvar grafitu a jeho pravidelné rozmístění ve struktuře litiny.

2) Očkování se provádí především u litin, které by za normálních podmínek tuhly bíle nebo makově. Po očkování dochází ke snadnější krystalizaci a tuhnutí. Vlivem uvolňování tepla během tuhnutí eutektických buněk se sníží přechlazení taveniny a sníží se rychlost postupujícího tuhnutí v okolí vznikajícího grafitu. To vede ke zmírnění vzniku zákalky (Fe_3C) případně k úplnému zamezení jejího vzniku.

Výhody očkované litiny proti litině neočkované jsou v těchto aspektech:

- 1) naočkováná litina tuhne v celém průřezu odlitku rovnoměrněji;
- 2) odlitek z naočkované litiny vykazuje stejnoměrnější mechanické vlastnosti v celém objemu odlitku.



Obr. 2– 7a Mikrostruktura neočkované LLG Obr. 2– 7b Mikrostruktura očkované LLG

Nejzásadnější změnu po očkování lze spatřit v typu grafitu, viz. ČSN 42 0461: „Hodnocení metalografické struktury litin“, který se mění z typu přechlazeného grafitu (D – tj. mezidendriticky neusměrněný viz. Obr. 2-7a, E - tj. mezidendriticky usměrněný), na typ tvaru nepřechlazeného grafitu (A – rovnoměrný viz. Obr. 2-7b).

Změny ve struktuře základní kovové hmoty litiny jsou charakteristické tím, že se očkovaním celkově potlačí vyloučení ledeburitu a do určité míry i samotného feritu. To je spojeno se vznikem grafitu typu A.

Stabilizační přísady

Stabilizační přísady se dávají do taveniny litiny za účelem legování. Používají se slitiny FeCr, FeMn, FeMo a pod., ovšem jejich hlavní složky mají většinou příliš silný antigrafitizační účinek. Jejich účelem je např. odstranění volného feritu ve struktuře litiny. Dávkování musí být přesné, aby při překročení kritického množství nedošlo ke vzniku volného cementitu, který zvyšuje sklon litiny k tvorbě zákalky. Proto byla hledána alternativa za tyto prvky, jako vhodné antiferitizační prvky se osvědčily cín, měď a antimon. Jejich použití zajišťuje výhodnou strukturu základní kovové hmoty (bez velkého množství feritu) s vyšší tvrdostí a bez nežádoucího volného cementitu. Přidání antiferitizačních prvků přispívá ke zlepšení dalších mechanických vlastností litiny.

V tabulce 2.1 je uvedeno chemického složení a vlastností litiny s lupínkovým grafitem

Tabulka 2.1 Chemické složení a vlastnosti litiny s lupínkovým grafitem

| Litina s lupínkovým grafitem – GJL | | | | | | |
|---|-----------------------|----------------|----------------|----------------|------------|------------------|
| ČSN EN-GJL | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 |
| C [hm.%] | 3,5 - 3,7 | 3,4 - 3,6 | 3,3 - 3,5 | 3,1 - 3,3 | 3,0 - 3,2 | 2,8 - 3,1 |
| Si [hm.%] | 2,3 - 2,5 | 1,9 - 2,2 | 1,8 - 2,1 | 1,7 - 1,9 | 1,6 - 1,8 | 1,5 - 1,7 |
| Mn [hm.%] | 0,4 - 0,6 | 0,5 - 0,7 | 0,6 - 0,8 | 0,8 - 1,0 | 0,9 - 1,1 | 1,1 - 1,3 |
| P [hm.%] | max. 0,7 | max. 0,6 | max. 0,5 | max. 0,5 | max. 0,3 | max. 0,25 |
| S [hm.%] | max. 0,15 | max. 0,15 | max. 0,15 | max. 0,15 | max. 0,15 | max. 0,10 |
| S_E | 1,05-1,11 | 0,99-1,05 | 0,93-0,99 | 0,87-0,93 | 0,81-0,87 | 0,75-0,81 |
| Doporučená tl. stěny odl. [mm] | 4 až 15 | 5 až 30 | 8 až 45 | 15 až 70 | 25 až 100 | 40 až 150 i více |
| Struktura | ferit + stopy perlitu | ferit + perlit | ferit + perlit | ferit + perlit | perlit | perlit |
| R_m [MPa] | 100-200 | 150-250 | 200-300 | 250-300 | 300-400 | 350-450 |
| R_{P0,2} [MPa] | - | 98-165 | 130-195 | 165-228 | 195-260 | 228-285 |
| R_d [MPa] | - | 600 | 720 | 840 | 960 | 1080 |
| E.10³ [MPa] | - | 78 -103 | 88 -113 | 103 -118 | 108 -137 | 123 -143 |
| HB | 180 | 200 | 220 | 240 | 260 | 270 |

2.4 Hodnocení mechanických vlastností litin

Mechanické vlastnosti litiny s lupínkovým grafitem jsou ovlivněny velikostí, tvarem a rozložením lupínků grafitu a charakterem základní kovové hmoty. U litin s lupínkovým grafitem struktura odlitku závisí na chemickém složení, především obsahu C, Si i dalších prvků, na rychlosti tuhnutí a chladnutí odlitku, na zárodečném stavu taveniny a popř. na charakteru tepelného zpracování, které může ovlivnit strukturu litiny. S ohledem především na rychlost tuhnutí, popř. chladnutí může u litin vzniknout až zákalka, proto bylo smluvně stanoveno, že pro zkoušky litiny budou vzorky odděleně lité a budou mít tvar tyče o \varnothing 30 mm. Pro orientaci jsou v tabulce 2.2 uvedeny hodnoty mechanických vlastností vybraných slitin soustavy Fe – C.

Tabulka 2.2 Přehled nejdůležitějších mechanických vlastností grafitických litin dle dříve používané ČSN

| Materiál | R _{PO,2} min. | R _m min. | A ₅ min. | HB | Mez únavy | | |
|---|---------------------------|------------------------|------------------------|---------|-----------|----------------|-------------------|
| | | | | | tah | plochý ohyb | ohyb za rotace |
| | | | | | /MPa/ | /MPa/ | /MPa/ |
| Litina s červíkovitým grafitem (LČG) | | | | | | | |
| feritická 10% perl. | 260 | 320 | 3-5 | 130-180 | 178 | 180 | 140 |
| fer.-per. 10-90% perl. | 300 | 400 | 2 | 160-220 | 185 | | |
| perlitická 90% perl. | 380 | 450 | 1 | 200-270 | 208 | 210 | 270 |
| Litina s lupínkovým grafitem (LLG) | | | | | | | |
| 42 2410 | | 100 | | 120-180 | | 70 | 47 |
| 15 | | 150 | | 140-200 | | 100 | 70 |
| 20 | | 200 | | 160-220 | | 120 | 93 |
| 25 | | 250 | | 180-240 | 90-100 | 150 | 116 |
| 30 | | 300 | | 200-260 | 110-120 | 180 | 140 |
| 35 | | 350 | | 210-270 | | | 163 |
| Litina s kuličkovým grafitem (LKG) | | | | | | | |
| 42 2303 | 230 | 370 | 17 | 140-150 | | | |
| 04 | 250 | 400 | 12 | 150-200 | | | 190 |
| 05 | 320 | 500 | 7 | 170-240 | | 200 | |
| 06 | 370 | 600 | 3 | 190-270 | | 250 | 250 |
| 07 | 420 | 700 | 2 | 230-300 | | 300 | |
| 08 | 450 | 800 | 2 | 250-350 | | 350 | 350 |
| Temperová litina | | | | | | | |
| s černým lomem 42 2531 | | 300 | 6 | max.180 | | | |
| 32 | 170 | 320 | 8 | max.180 | | | |
| 33 | 180 | 330 | 10 | max.180 | | | |
| 34 | 190 | 350 | 12 | max.180 | | | |
| s bílým lomem 42 2536 | | 300 | 7 | max.220 | | 140 | |
| 40 | 180 | 360 | 10 | max.220 | | | |
| perlitická 42 2545 | 260 | 440 | 7 | max.200 | | | |
| 50 | 300 | 490 | 5 | max.230 | | | |
| 55 | 330 | 540 | 4 | max.240 | | | |

| | | | | | | | |
|-----------------|---------|-----|-----|----|---------|-----|-----|
| Ocel na odlitky | | | | | | | |
| uhlíková | 45 2630 | 200 | 370 | 25 | 105-150 | | |
| | 40 | 240 | 440 | 22 | 125-170 | 180 | |
| | 50 | 260 | 500 | 20 | 145-185 | 250 | |
| | 60 | 300 | 590 | 12 | 170-210 | 280 | 250 |
| | 70 | 380 | 690 | 10 | 200-240 | | |

Dle materiálových listů ČSN EN – GJL je litina s lupínkovým grafitem rozdělena do šesti jakostí tříd dle pevnosti v tahu viz tabulka 2.1. Pevnost v uvedené normě se vztahuje výhradně na standardní zkušební vzorek lité odděleně.

Další důležitým ukazatelem vlastností LLG je Youngův modul pružnosti v tahu E_0 , který lze na základě zkoušek prováděných dle Collauda vyjádřit tímto vztahem:

$$E = R_m / HB \cdot 10^5 \quad [\text{MPa}] \quad (2.8)$$

Hodnoty vypočtené dle tohoto vztahu se dobře shodují s hodnotami experimentálně zjištěnými. Měření ukázala, že litina má oblast plastického prodloužení v silné závislosti na charakteru základní kovové hmoty a nemůžeme ji tedy považovat za křehký materiál. Pevnost LLG v tlaku je přibližně třikrát vyšší než pevnost v tahu, pevnost v ohybu je zhruba dvojnásobná než pevnost v tahu, avšak závislá na tvaru průřezu. Poměr pevnosti v ohybu k pevnosti v tlaku se pohybuje mezi 1,8 až 2,3.

Litina s lupínkovým grafitem, díky své heterogenní struktuře, se neřídí Hookovým zákonem.

Pro hodnocení jakosti litiny s lupínkovým grafitem byla zavedena řada ukazatelů. Mezi nejběžněji používané patří stupeň eutektičnosti Sc a uhlíkový ekvivalent CE, zahrnující vliv průvodních prvků na posuv eutektického bodu (viz kapitola 2.1).

Ukazateli mechanických vlastností jsou mez pevnosti v tahu R_m a tvrdost dle Brinella HB. K určení mechanických vlastností litiny s lupínkovým grafitem a perlitickou základní kovovou hmotou můžeme použít zjednodušených empirických vztahů, které platí pro standardní zkušební tyče $\varnothing 30$ mm, lité odděleně.

K hodnocení mechanických vlastností litiny s lupínkovým grafitem se používají matematické vztahy, které ukazují souvislost mezi chemickým složením a

základními mechanickými vlastnostmi dané litiny. Byly proto sestaveny matematické rovnice pro výpočet pevnosti v tahu, tvrdosti a modulu pružnosti u vzorků litých v provozních podmínkách. Pevnost v tahu lze také určit v závislosti na stupni eutektičnosti (S_c) litiny pro jakostní litinu s lupínkovým grafitem Ø 30 mm, podle Collouda:

$$R_m = 1000 - 809 S_c \quad (2.9)$$

Pro výpočet tvrdosti dle Brinella lze použít vztah, který zahrnuje pevnost v tahu:

$$HB = 100 + 0,438 \cdot R_m \quad \text{při } R_m > 196 \text{ MPa} \quad (2.10)$$

$$HB = 44 + 0,724 \cdot R_m \quad \text{při } R_m < 196 \text{ MPa, dle [2],} \quad (2.11)$$

kde značí: HB – tvrdost podle Brinella.

Při zahrnutí stupně eutektičnosti (S_c), lze získat pro výpočet tvrdosti vztah:

$$HB = 465 - 270 S_c \quad (2.12)$$

Ke kvantitativnímu vyjádření výrobních vlivů a respektování vlivu metalurgického výrobního postupu se používá hodnota stupně zralosti RG, relativní tvrdost RH. Stupeň zralosti RG je poměr mezi pevností v tahu vyrobené litiny, zjištěné na zkušební tyči o Ø 30 mm a pevností vypočtené z S_c dle následujícího vztahu:

Stupeň zralosti RG:

$$RG = \frac{(R_m)_{\text{měř.}}}{(R_m)_{\text{výpoč.}}} = \frac{(R_m)_{\text{měř.}}}{(100,6 - 80 \cdot S_c) \cdot 10} \quad (2.13)$$

Relativní tvrdost RH je poměr mezi tvrdostí zjištěnou na vyrobené litině na zkušební tyči o Ø 30 mm a tvrdostí vypočítané ze vztahu pro stupeň eutektičnosti S_c .

$$RH = \frac{(HB)_{\text{měř.}}}{(HB)_{\text{výpoč.}}} = \frac{(HB)_{\text{měř.}}}{465 - 270 \cdot S_c} \quad (2.14)$$

Relativní tvrdost a zralost litiny hodnotí metalurgické vlivy při výrobě litiny. Litina je tím kvalitnější, čím je vyšší její stupeň zralosti a nižší relativní tvrdost. To se vyjadřuje koeficientem jakosti:

$$Q_j = \frac{RG}{RH} = \frac{(R_m)_{m\acute{e}ř.}}{(HB)_{m\acute{e}ř.}} \cdot \frac{465 - 270 \cdot S_c}{(100,6 - 80 \cdot S_c) \cdot 10} \quad (2.15)$$

Všechny uvedené vztahy jsou stanoveny na základě zkoušek litinových tyčí, nejčastěji Ø 30 mm.

Hodnocení jakosti litiny s lupínkovým grafitem, jak již bylo výše popsáno, nám poskytuje informace pouze o odděleně litých zkušebních tyčích Ø 30 mm, proto je nutné vzít v úvahu rozdílné podmínky krystalizace u odděleně lité zkušební tyče a pro vlastní odlitek. Rychlost ochlazování, která určuje výslednou strukturu litiny je různá v rozdílných tloušťkách stěn odlitku, ale je závislá na hmotnosti daného odlitku. Z těchto důvodů je nutné posuzovat litinu s lupínkovým grafitem i podle hodnot měřitelných veličin na daném odlitku. Jakost litin lze tedy posuzovat například podle tvrdosti HB. Pokud je to možné, mohou se užívat destruktivní metody pro zjištění mechanických vlastností materiálu nebo vyhodnotit strukturu litiny na vybroušených metalografických vzorcích.

V případě, že nelze použít destruktivních metod lze za předpokladu, že není odlitek vadný, určit mechanické vlastnosti – pevnost v tahu R_m a tvrdost HB metodami ultrazvukovými a magnetickými. Jejich největší předností je možnost měřit i v těžko přístupných místech pro tvrdoměr, nenáročnost na obsluhu s minimem nákladů na realizaci měření.

2.5 Tavicí zařízení pro výrobu litiny s lupínkovým grafitem

Pro přípravu taveniny litiny s lupínkovým grafitem lze v zásadě použít dvě tavicí zařízení – kuplovnu nebo indukční pec.

Kuplovna - tavicí zařízení, které slouží k výrobě taveniny, nejčastěji pro výrobu litiny s lupínkovým grafitem. Je to šachtovitá pec kruhového průřezu. Výška kuplovny se označuje vzdáleností od dna k prahu zavážecího otvoru. Velikost kuplovny se hodnotí průměrem šachty v oblasti dmyšen, obvykle je od 0,7 do 1,4 m. Výška bývá 4,5 až 7,5 m u velkých kuploven. Povrch je z ocelového pláště. Kolem je přívod vzduchu pomocí větrovodu. Součástí kuplovny je vsázkový otvor, žlábkový pro taveninu a strusku, dvířka

pro manipulaci a vyprazdňování kuplovny a další části. Z tepelného hlediska kuplovna funguje jako protiproudý výměník tepla. První pec této konstrukce byla patentována v Anglii v roce 1794. Od této doby prošly kuplovny různým vývojem, avšak jejich původní princip zůstal zachován. A doposud jsou považovány za ekonomicky výhodná tavící zařízení.

Její výhodou je vysoká měrná výrobnost a nízká spotřeba paliva. Konstrukce kuplovny i provozní obsluha je poměrně jednoduchá. Přitom můžeme získat litinu o teplotě až 1450 °C. Další výhodou je možnost změny složení vsázky v průběhu tavby, což je důležité zejména při výrobě různých druhů litin s lupínkovým grafitem.

Tavení v kuplovně má i své nevýhody, k nim se řadí kolísání chemického složení litiny během tavby (obtěžně se taví litiny s nízkým obsahem uhlíku a nemožnost udržení teploty taveniny bez použití speciálního zařízení - např. indukční předpecí).

Přímý styk taveniny s palivem a kupolními plyny jsou příčinou nežádoucích příměsí v litině a zdrojem zvýšeného obsahu nekovových vměstků a plynů. Také přehřívání litiny na vyšší teploty se nepovažuje za výhodné. Uvádí se, že tepelná účinnost při vlastním tavení je asi 50 %, ale při přehřívání jen asi 5 %.

Rozhodujícím parametrem kuplovny je tavící výkon, který orientačně lze stanovit:

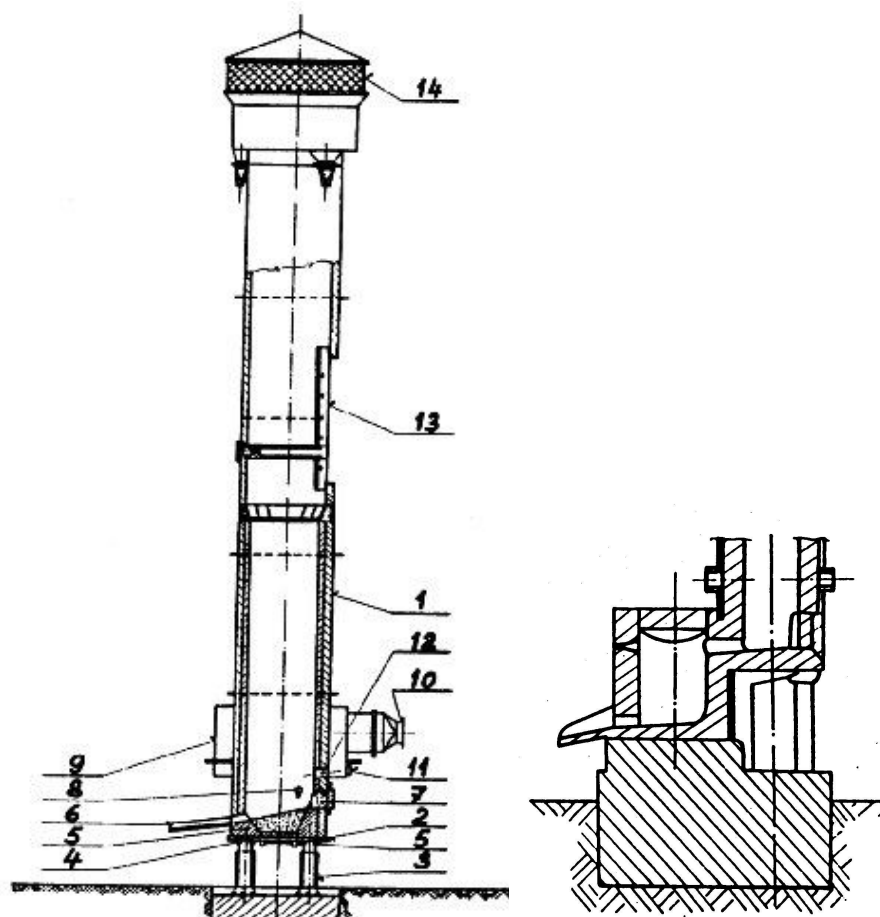
$$P_{hod} = (6až8).D^2 \text{ [t.hod}^{-1}\text{]}, \quad (2.16)$$

kde značí: P_{hod} - tavící výkon kuplovny [t.hod⁻¹];

D - průměr kuplovny v místě dmyšen [m].

Dnes existují kuplovny různé konstrukce, které lze rozdělit podle různých kritérií, např. dle provozu (s jednodenním provozem nebo s kampaňovitým provozem), podle předpecí (s předpecím; bez předpecí), předpecí může být vyhříváné nebo bez vyhřívání.

Na obr. 2 – 8 je uvedeno schéma kuplovny. Z metalurgického hlediska kuplovna bez předpecí se používá nejčastěji ve slévárnách, které vyrábí lehké tenkostěnné odlitky nevyžadující nahromadění většího množství tekuté litiny. V kuplovně bez předpecí je tekutá litina větší dobu ve styku se základovým koksem, čímž se zvyšuje obsah uhlíku a současně v důsledku menšího ochlazování je možno v ní dosáhnout vyšší teploty litiny. Tato kuplovna není vhodná pro litinu s nižším obsahem uhlíku.



Obr. 2-8 Schéma kuplovny a detail jejího předpecí

Popis kuplovny: **1**- válcový plechový plášť, **2**- Základová deska kuplovny **3**- nosné sloupky. **4** - dvířka kuplovny **5** - petlice, **6** - odpichový žlábek, **7** - pracovní otvor pece s dvířky, **8** - otvor pro vypouštění strusky, **9** - okružní větrovod, **10** - potrubí spojující ventilátor s okružním větrovodem. **11** - nástavky k čištění dmyšen a k porovnání tavby v šachtě, **12** - tzv. dmyšní trubice, **13** - závažecí tzv. kychtový otvor **14** - komín kuplovny ukončen lapačem jisker

Podle vháněného vzduchu (větru) se rozdělují kuplovny na studenovětrnné a horkovětrnné.

Pracovní prostor kuplovny se skládá z těchto důležitých částí:

a) **nístěj** je spodní část pece až do úrovně dmyšen. Její výška je 0,50 až 0,80 m. Nístěj je při tavení uzavřena spodními dvířky nad nimiž je vrstva žáruvzdorné výdusky se sklonem k odpichovému otvoru. U kuploven s dlouhodobým provozem nejsou ve

spodní části nístěje dvířka, dno pece je pevné. Vstup do pece při opravách se provádí bočním otvorem.

U kuploven s periodickým odpichem (vypouštěním taveniny) slouží ke shromažďování roztaveného kovu mezi základovým koksem. Využitelný objem je 45 % objemu nístěje pece. Odpich se provádí při zaplnění nístěje kovem, tj. když struska plovoucí na jeho povrchu dosahuje blízkosti úrovně dmyšen.

Struska se vypouští po odpichu několika dávek kovu struskovým otvorem, který je umístěn cca 0,2 až 0,3 m nad otvorem pro odpich kovu v protilehlé části kuplovny. Odpichový otvor pro kov a strusku je uzavřen jílovo-grafitovou zátkou.

U kuploven s kontinuálním odpichem neplní nístěj funkci zásobníku kovu a také mívá menší výšku cca 0,3 až 0,4 m. Natavený kov odtéká společně se struskou plynule odpichovým otvorem do sifonu, kde se struska odděluje od taveniny.

b) **šachta** je střední část kuplovny od dmyšních trubic až po sazebnu. U starších kuploven je šachta válcového tvaru, u modernějších se směrem k nístěji mírně rozšiřuje. V horní části šachty dochází k přehřívání vsázky, ve spodní k tavení a přehřívání taveniny litiny. Po celé výšce je tvořena žáruvzdornou vyzdívkou. Existují již i bezvyzdívkové kuplovny, u kterých je šachta tvořena jen vodou chlazeným ocelovým pláštěm. Rovněž u některých pecí s vyzděnou šachtou je vodní chlazení pláště, aby se zvýšila životnost vyzdívky.

c) **dmyšní trubice** se volí k průměru kuplovny v poměru 1:6 až 1:10. Obvyklý tvar je obdélníkový. U malých kuploven se volí 4 až 6, u větších 8 až 10 trubic po obvodu. Pro větší intenzifikaci tavení se volí ve dvou řadách. Množství dmýchaného větru do kuplovny vychází z rozměrů šachty a potřebného tlaku větru (na základě empirie existují tabulky).

Ve slévárnách se často vyžaduje větší množství taveniny, proto se používá *předpecí kuplovny*, sloužící jako speciální zásobník pro taveninu uložený mimo pracovní část kuplovny, viz obr. 5-1 vpravo. Předpecí bývá vyhříváné (např. indukčně, tj. předpecí indukční). Roztavená litina se ihned po svém roztavení odvádí zvláštním kanálkem do předpecí kuplovny. Tato litina se v kuplovně s předpecí nauhličuje méně a také obsahuje méně síry. V praxi se setkáváme s různými typy předpecí.

Vsázkové suroviny kuplovny - k tavení litiny se používají různé suroviny: kovová vsázka, koks, struskotvorné látky a tavidla. Do kuplovny se vsází slévárenský koks, který plní dvě funkce a podle toho se dělí na základový a tavící. Správná výška

základového koksu v kuplovně je důležitým předpokladem optimálního chodu kuplovny. Při velké výšce se musí nejdříve přebytečné množství spálit a při malé výšce vytéká z kuplovny tavenina s nižší teplotou. Správná výška základového koksu nad úrovní dmyšen je závislá na tlaku dmýchaného větru a přibližně se určí podle vztahu:

$$h_{z.k.} = 175 \cdot \sqrt{p_v} + 150 \text{ [mm]}, \quad (2.17)$$

kde značí: $h_{z.k.}$ - výšku základového koksu nad úrovní dmyšen [mm];

p_v - tlak dmýchaného větru [kPa].

Výška základového koksu musí být v rovnováze s množstvím dmýchaného větru. Prvním signálem nesprávného chodu kuplovny bývá pokles teploty kovu na žlábků. Příčinou bývá malá výška základového koksu, která je důsledkem i malého nauhličení taveniny (pokles měřeného S_c). V tomto případě je nutné zavést do kuplovny mimořádnou dávku koksu o výšce cca 0,15 m. Do doby než dojde ke zvýšení obsahu uhlíku v litině přidáním koksu, je možno teplotu kovu a obsah uhlíku zvýšit vyšší teplotou vhněného větru.

Množství základového koksu se určuje buď výpočtem pomocí hustoty koksu, nebo se výška základového koksu měří výškovou měrkou ze zavážecího otvoru. Zapálení kuplovny se provádí pracovními dvířky, obvykle plynovým hořákem. Po rozžhavení koksu se otvor ve dvířkách zazdí, omaže žáruvzdorným jílem, dvířka se uzavřou a zajistí. Pak následuje zavážení kuplovny, resp. plnění šachty vrstvami vsázky (kovový podíl, tavící koks, struskotvorné látky, tavidla, atd.).

Tavba začíná dmýcháním větru do kuplovny. První kapky roztaveného kovu je možno průzory ve dmyšných pozorovat obvykle již za 8 až 10 min. Pokud to trvá déle, byla zvolena vysoká úroveň základového koksu. V průběhu tavby se pec zaváží tak, aby byla neustále plná. Zavážení kuplovny bývá řízeno radioizotopovými čidly umístěnými v horní části šachty. Pokud je vsázka pod úrovní čidel, pak automaticky nastává zavážení pece.

Kovová vsázka je tvořena surovým slévárenským železem, vratným materiálem, litinovým odpadem, ocelovým odpadem a třískami.

- *Slévárenské surové železo* obsahuje 2 až 3,5 % Si; 3,7 až 4,3 % C; 0,4 až 1,3 % Mn; 0,2 až 0,7 % P; méně než 0,03 % S.
- *Vratný materiál* tvoří vtokové soustavy, nálitky a zmetky.
- *Litinový odpad* je to v podstatě spotřebitelský odpad, zbytky rámců strojů. Není známé chemické složení. Musíme dávat pozor, aby ho netvořila nějaká tvrdá speciální litina.
- *Ocelový odpad* je v podstatě ocelový šrot. Vyznačuje se nižším chemickým složením dominantních prvků. Musíme dávat pozor, aby ho netvořila ložiska a ocel s vysokým obsahem např. Cr, Ti, W, V, atd. Přítomnost těchto prvků by činila potíže při tavení.
- *Třísky* nebývají vhodným materiálem pro tavení. Za normálního stavu bývají mastné a jejich malé částice by se propalovaly. Pro jejich použití k tavně je nutno je odmastit a slisovat do balíku, aby nebyl jejich značný propal. Značný propal třísek by vedl ke vzniku velkého množství strusky. Používá se jich cca 5 % hmotnosti vsázky.

Legury slouží pro úpravu chemického složení taveniny litiny. Obvykle je nutno upravit obsah Si a Mn. Legující prvky Cr, V, Cu, Ni, Mo, P, Al se používají v kuplovních málo. Jako *mikrolegury* pro ovlivnění kovové matrice litiny se používá Sn, výjimečně Sb, Ti, B. Hlavními druhy legur jsou:

- *Ferosilicium* - používá se pro úpravu chemického složení a pro očkování (FeSi45 až 55, FeSi65 až 75, FeSi 90).
- *Karbid křemíku SiC* se v tavicím pásmu kuplovně rozkládá a Si se rozpouští v tavenině.
- *Feromangan* se používá pro úpravu chem. složení Mn, obsahuje 75 až 85 % Mn a 7 % C.
- *Ferochrom* se používá jako vysokouhlíkový FeCr50 až 70 s 6 až 8 % C. Stabilizuje cementit a přispívá k perlitické matici litiny.

Nauhlčovadla zvyšují obsah uhlíku (smolný koks, petrokoks, elektroodový grafit, antracit, syntetický grafit).

Zásadité strusky dovolují snížit obsah síry v litině. K tomu se používá MgO, který se přidává do pece ve formě dolomitového vápence. Ten přispívá k metalurgickému procesu - přechodu síry z taveniny do strusky. V litině tak zůstává cca 0,04 % S.

Vysoké nahličení taveniny, malý tavící výkon, drahé zásadité vyzdívkové materiály a další nevýhody mají za následek, že se u nás kuplovny bazického charakteru nepoužívají.

Proto se taví v kyselých kuplovnách a snížení síry se provádí mimopecní rafinací. Nebo se k tavení používají jiné typy pecí (např. indukční).

V průběhu tavby se kontroluje teplota a chemické složení taveniny. Na správný chod kuplovny má vliv:

- a) výška základového koksu;
- b) množství a teplota dmýchaného větru.

Délka tavby je limitována opotřebením vyzdívky. Maximální doba tavení u běžných kuploven je 12 až 16 hod. Opotřebení vyzdívky je způsobeno mechanickým odíráním pevnou vsázkou a reakcí se struskou. V průběhu tavby se opotřebením vyzdívky zvětšuje průměr pece, resp. výkon, mění se podmínky tavení, teplota a chemické složení taveniny. Při velkém opotřebení vyzdívky může dojít k propálení pláště kuplovny.

Tavba končí přerušením zavážení pece. Vsázka v peci se postupně dotaví, vypustí se poslední kov a dno pece se tzv. podrazí otevřením dvířek ve dně pece, kdy vypadne zbytek koksu a strusky na připravenou podlahu (suchý písek tvaru ploché vany).

Oprava běžné kuplovny se provádí druhý den. Spočívá ve spravení opotřebovaných míst vyzdívky, odpichového otvoru a licího žlábků. Z tohoto důvodu bývají dvě kuplovny s periodickým odpichem - v jedné se taví, druhá se opravuje.

3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE

Experimenty, které byly prováděny v této práci, byly zaměřeny na sledování výsledků prováděného dvouletého způsobu očkovaní při výrobě litiny s lupínkovým grafitem ve slévárně Ferex-castings s.r.o. Liberec – Ostašov. Litina s lupínkovým grafitem je v této slévárně tavena ve studenovětrné kuplovně s plynovým předpecím, pak následuje přelévání do transportní pánve, zde je prováděno očkovaní (3kg Superseed do proudu taveniny při předepsané teplotě). Z transportní pánve je tavenina vlévána do indukčního lícího předpecí realistic ABE. Tento postup transportu taveniny často způsobuje vymizení očkovacího efektu, avšak jiné uzpůsobení těchto zařízení s ohledem na zkrácení doby transportu taveniny není možný. Proto hlavním záměrem řešení diplomové práce byly dva hlavní cíle:

- 1) Dlouhodobé sledování a vyhodnocení stávajícího způsobu očkovaní při výrobě skříní elektromotorů (ve slévárně označováno jako štíty);
- 2) Návrh a odzkoušení očkovaní novým způsobem – použití tuhých očkovacích tělísek „Optigran“ od firmy Ashland- Südchemie – CZ s.r.o. Brno.

Bylo očekáváno, že použití nového způsobu očkovaní přispěje nejen ke získání homogenní struktury a rovnoměrného rozložení lupínkového grafitu ve všech částech odlitku, ale i zlepšení obrobiteľnosti a mechanických vlastností. Tyto úkoly jsou neustále řešeny s ohledem na zvyšující se požadavky výroby tenkostěnných odlitků z litiny s lupínkovým grafitem.

K experimentům prováděným s ohledem na sledování účinku očkovacího procesu byly vybrány odlitky skříně elektromotoru. Pro odzkoušení nového typu očkovačů byly použity jednoduché odlitky tvaru destiček s různou tloušťkou.

3.1 Charakteristika přípravy taveniny ve slévárně Ferex-castings s.r.o. Liberec

Tavící zařízení - tavenina je připravována ve slévárně Ferex – castings s.r.o, v šachtové tavící peci - kuplovně o průměru 1000 mm s plynovým předpecím a kyselou vyzdívkou o celkovém výkonu 8 t litiny za hodinu na žlábků peci. Tato pec je studenovětrná s vnitřní injektáží kyslíku. Vyrobená ve firmě Škoda Klatovy v roce 1999. Pro vyzdívku byly použity šamotové cihly dodané firmou *Průmyslová keramika Rájec – Jestřebí* a pro vymazání a pro opravy vyzdívky se používá vymazávací hmota dodaná firmou *Žárohmoty Třemošná*.



Obr. 3-1 Kuplovna s plynovým předpecím

Vsázkové suroviny – na 100 kg vsázky se používá 42 kg vratného materiálu, 17 kg slévárenského železa, 26 kg litinového zlomu a 15 kg ocelového šrotu. . Pro zvýšení obsahu křemíku v tavenině bylo použito 4,95 kg ferosilicium (FeSi 75).

Tavenina na žlábků pece při správném procesu tavení vykazuje teplotu $1440\text{ }^{\circ}\text{C}$ a chemické složení taveniny je: 3,4 až 3,5 % C; 1,98 až 2,11 % Si, 0,44 až 0,5 % Mn; max. 0,18 % P; max. 0,09 % S. Teplota taveniny vytékající z plynového předpecí je $1360\text{ až }1369\text{ }^{\circ}\text{C}$, při této teplotě je prováděno očkování 3 kg Superseed do proudu taveniny, která vytéká do transportní pánve.

Očkovadlo Superseed je očkovadlo na bázi ferosilicia, kde je hlavním očkovacím prvkem stroncium. Nízký obsah hliníku a vápníku zajišťuje minimální sklon k tvorbě strusky po přidání do kovu. Může být nasypán na dno pánve a zalit tekutým kovem a nebo přímo přidáván do proudu taveniny. Je nutné upozornit, že očkovadla ztrácejí svoji schopnost snižovat zákalku, je-li kov před litím dlouho udržován v pánvi. Proto se potom doporučuje doočkování. Jeho chemické složení je: $75 \pm 2\text{ \% Si}$, $0,8 \pm 0,2\text{ \% Sr}$, max 0,1% Ca, max 0,5% Al. [11]

3.1.1 Metody kontroly kvality taveniny litiny

Při sériové výrobě odlitků jsou ve slévárně Ferex – castings s.r.o, zavedeny tyto metody kontroly taveniny litiny:

1) *zkoušky litiny v roztaveném stavu během tavby* - měření teploty litiny v roztaveném stavu v odlučovači strusky každou půlhodinu, při očkování namátkově každou hodinu a při odlévání namátkově každou hodinu. Měření se provádí ponorným pyrometrem s digitálním vyhodnocením.

2) *klínová zkouška* - měří se výška zákalky litiny odebrané z odlučovače strusky kupolní pece každou půlhodinu a po naočkování současně s odběrem vzorku CE.

3) *příprava vzorků pro chemickou analýzu* – se provádí odléváním taveniny do měděné kokilky, to je prováděno současně s odběrem taveniny pro odlévání klínku.

4) *odběr vzorků pro sledování kvality litiny* - provádí se dva způsoby odběrů:

a) přímo z proudu taveniny ze žlábků plynového předpecí tzv. ostrá zkouška, která slouží k určení jakosti natavené litiny. Ostrá zkouška se musí odebírat ráno po rozjezdu kuplovny, po přesazení vsázky a podle potřeby obsluhy předpecí, aby správně mohla posoudit vyráběnou jakost litiny.

b) z naplněné pánve po očkování a případném legování (hodnoty klínků musí odpovídat velikostem uvedeným v návodkách umístěných u plynového předpecí) pro jednotlivé jakosti litiny a sortiment odlitků.

5) *stanovení hodnot uhlíkového ekvivalentu CE* - provádí se po naočkování a stažení strusky z pánve každou půlhodinu

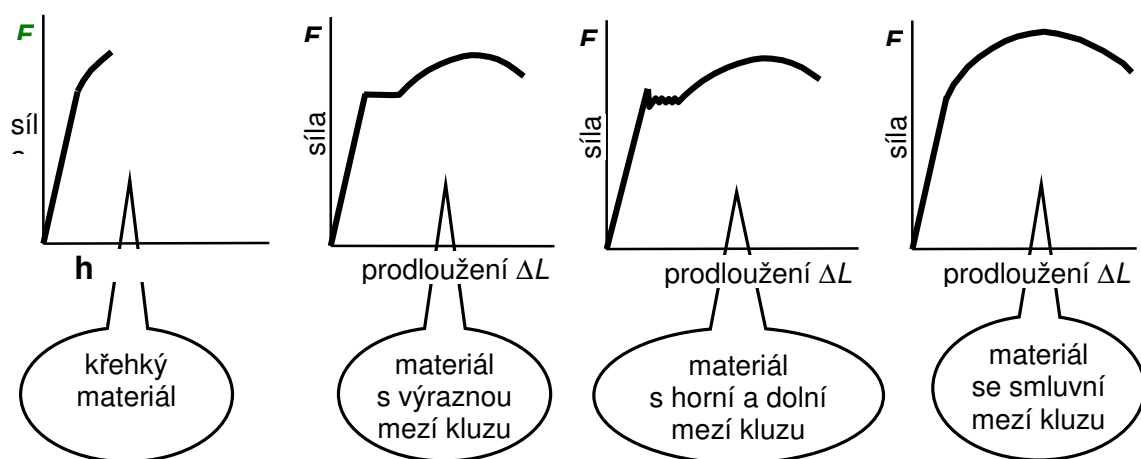
6) *chemická analýza vzorků z tavby* - provádí se dle metodiky LECO – odlití vzorků ze šedé litiny pro analýzu obsahu uhlíku a síry, průběžná kontrola funkce přístroje na stanovení CE

7) *odlívání odděleně litých tyčích* - vzorky taveniny pro výrobu litých tyčí se odebírají jednou v každé směně a odlévají se do příslušné slévárenské formy. V jedné formě se odlévají současně tři zkušební tyče Ø 30 x 600 mm. Tyče jsou dále podrobeny zkouškám dle normy.

3.1.2 Zkouška tahem

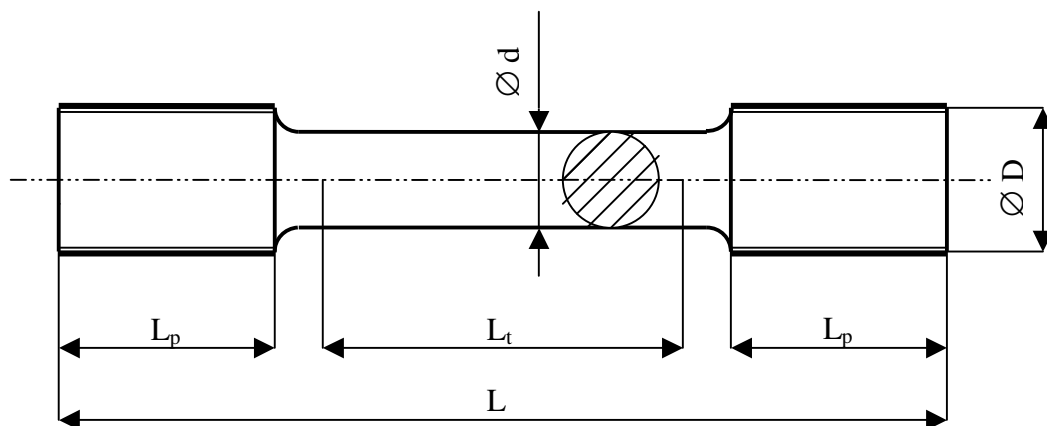
Zkouška tahem je nejrozšířenější a nejvhodnější mechanickou zkouškou. Je jednou ze základních a nejdůležitějších zkoušek vůbec a je předepsaná normou: EN 10002-1. Při tahovém namáhání dochází k deformaci zkušebního tělesa, které se prodlužuje až do přetržení. Zjišťují se přitom napětové a deformační charakteristiky, kterými jsou pevnost v tahu, mez kluzu, tažnost a kontrakce. Zkouška tahem byla

provedena na zkušebních tělesech jednoduchého tvaru (těleso kruhového průřezu). Hlavy zkušebních tyčí mohou být buď se závitem, nebo hladké podle použitých čelistí zkušebního stroje. Zkušební tyč je vhodným způsobem (pomocí klínů, závitových, osazených nebo hydraulických čelistí) upnuta do trhačího stroje tak, aby zatížení působilo pokud možno v ose zkušební tyče. Po spuštění motoru je do pohybu uveden střední příčník. Zkušební tyč je tak zatěžována silou F , jejíž velikost je registrována v závislosti na prodloužení ΔL zkušební tyče. Zkouška tahem obvykle končí porušením zkušební tyče. Vynesení zátěžné síly F [N] a prodloužení zkušební tyče ΔL [mm] do grafu vznikne tahový diagram, v němž je nezávisle proměnnou ΔL a závisle proměnnou F . Na obr. 3 - 2 jsou uvedeny základní typy těchto tahových diagramů pro kovové materiály:



Obr. 3 – 2 Základní typy tahových diagramů kovových materiálů

Odlité zkušební tyče byly obrobeny do tvaru, viz obr. 3-3.



Obr. 3 - 3 Tvar zkušební tyče $\varnothing 30$ mm pro zkoušku tahem dle EN 10002-1

Ze zkoušky tahem jsou pro experiment zpracovávány v této diplomové práci důležité tyto veličiny:

a) mez pevnosti R_m : Je určena největším zatížením F_m [N], které je zaznamenáno v průběhu zkoušky po dosažení meze kluzu.

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (3.1)$$

Kde R_m značí napětí odpovídající největšímu zatížení F_m vztaženého na počáteční plochu příčného průřezu zkušební tyče S_0 .

b) tažnost A [%], která je dána vztahem

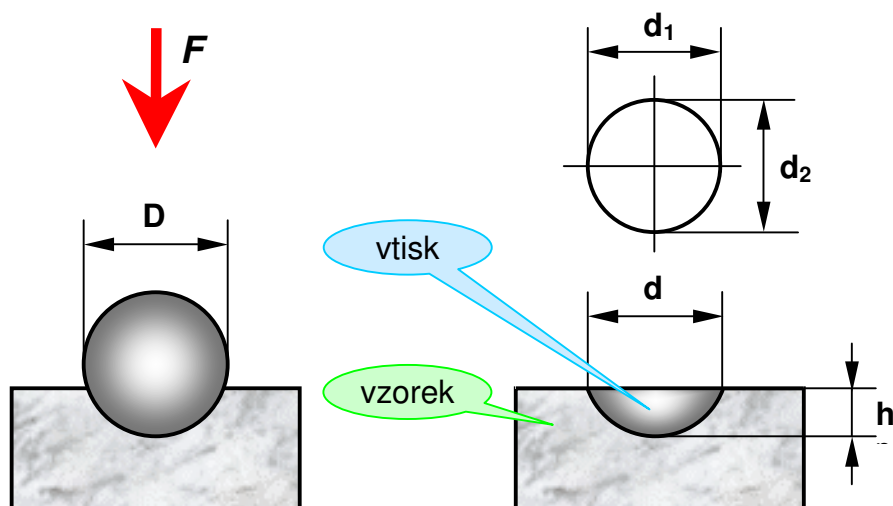
$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100 \quad (3.2)$$

3.1.3 Zkouška tvrdosti podle Brinella

Autorem této metody je švédský inženýr J. A. Brinell. Metoda byla poprvé představena v roce 1900 na 2. mezinárodním kongresu o zkoušení materiálů. Ujala se a dnes je nejrozšířenější zkouškou tvrdosti na světě. Je vhodná na zkoušení měkkých a středně tvrdých materiálů s heterogenní strukturou. Zkouší se poměrně velký objem kovu, čímž získáme průměrnou hodnotu tvrdosti celé struktury materiálu.

V současnosti u nás pro tuto zkoušku platí norma **ČSN EN ISO 6506**, která byla schválena 1. 12. 2000. Norma je platná pro kovové materiály.

Princip metody (obr.3 - 4) spočívá v zatlačování vnikacího tělesa – kalené ocelové kuličky (metoda HBS) nebo kuličky z tvrdokovu (metoda HBW) o průměru D – do povrchu zkoušeného tělesa silou F . Po odlehčení se určí průměr vtisku d .



Obr. : 3 – 4 Schéma zkoušky tvrdosti podle Brinella



Obr. 3 - 5 Ukázka vtisku při zkoušce tvrdosti podle Brinella

Vztah pro výpočet tvrdosti podle Brinella:

$$HBS (HBW) = 0,102 \cdot \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (3.3)$$

HBS nebo *HBW*... tvrdost podle Brinella

F... zkušební zatížení v [N]

D... průměr kuličky v [mm]

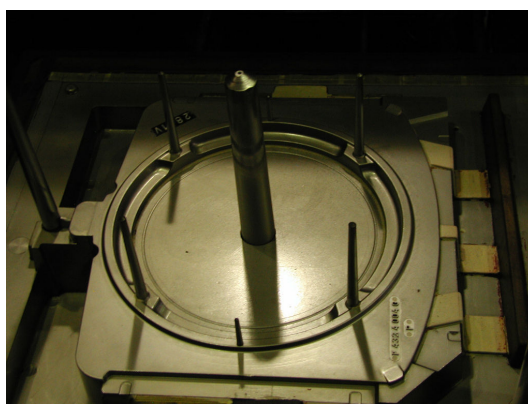
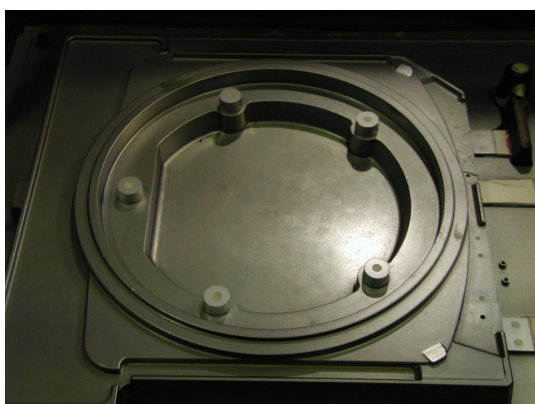
d... aritmetický průměr vtisku v [mm]; $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$

h... hloubka vtisku v [mm]; $h = \frac{D - \sqrt{D^2 - d^2}}{2}$

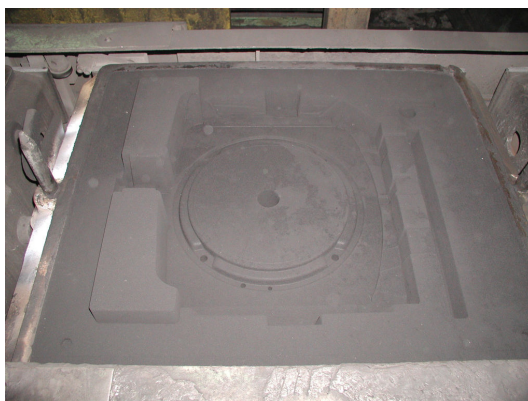
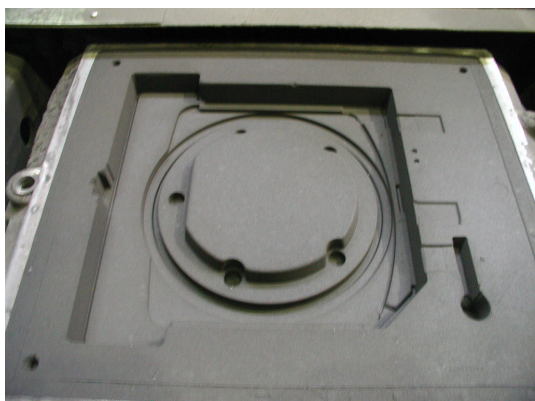
konstanta... $0,102 = \frac{1}{g} = \frac{1}{9,807}$

3.2 Výroba forem pro odlitky skříně elektromotoru

Formy ve slévárně Ferex – castings s.r.o., Liberec se vyrábějí na formovací lince GF se střešacím strojem s dolisováním a dělenou formovací hlavou o výkonu 120ks/směna a rozměrech rámu 850 x 740 x 300 mm při rozměrech základní formovací desky 1360x1040mm. Pro přípravu jednotné formovací směsi se používá kolový mísič MK – 3. Směs se skládá z vratného písku, křemenného ostříva O – 27 (dávkování je operativně upraveno dle výplavu, maximálně však do výše 2% z vratu), aktivovaného bentonitu a vody na předepsanou vlhkost 3,5 až 4,5%. Prodyšnost směsi je určena min.210 j.p.SI, pevností v tlaku 160 až 190 kPa a spěchovatelností 35 až 45%. Modelová deska formy je na obr. 3 – 4.

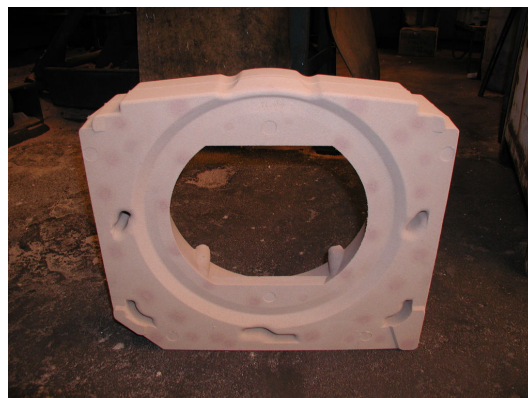


Obr. 3 - 4 Modelová deska



Obr. 3 – 5 Části forem pro výrobu skříně elektromotoru

Dále se používají dvě jádra. Jedno jádro má hmotnost 26 kg vyrábí se z jádrové směsi pojené pryskyřicí a vytvrzované CO_2 , viz obr. 3 – 6. Druhé jádro je o hmotnosti 0,80 kg a je vyráběno ze stejné jádrové směsi i stejnou technologií.



Obr. 3 - 5 Jádro o hmotnosti 26 kg z jádrové směsi s pryskyřičným pojivem

3.3 Výroba odlitků skříně elektromotoru

Po založení obou jader a složení částí forem se vtokové jamky vkládá licí zátka o hmotnosti 0,35 kg. Do připravených forem následuje strojní odlití z teploty 1360 až 1370 °C. Při současně prováděné klínové zkoušce je nutno sledovat velikost zákalky, která má být max. 3mm, jen výjimečně 5 mm. Současně se přilévají zkušební tyče. Po odlití formu jdou do chladicího tunelu, kde setrvávají min. 3 hodiny, pak může následovat vytlučení odlitků a odstranění vtokové soustavy. Na obr. 3 – 6 je opracovaný odlitek skříně elektromotoru.



Obr. 3 - 6 Pohled na opracovaný odlitek skříně elektromotoru.

Vyhodnocením odlitků a výsledků vzorků z přilítých tyčí bylo zjištěno, že stávající postup přípravy taveniny především s ohledem na efektivnost očkovacího procesu je nevyhovující. Odběratelé skříní elektromotorů si stěžovali, že odlitky v tenkých partiích jsou příliš tvrdé s nehomogenní strukturou. Proto byla provedena analýza metalurgické přípravy výroby litiny s lupínkovým grafitem a bylo přistoupeno k návrhu změny očkovačla.

Tyto výše uvedené aspekty byly také potvrzeny zkouškami mechanických vlastností přilítých tyčí, které byly dlouhodobě sledovány. Výsledky tohoto výzkumu jsou patrné z tabulky, viz příloha č.1. Hodnoty z této tabulky byly též statisticky zpracovány do grafické podoby pomocí lineární regrese. Tím byly získány závislosti pevnosti a tvrdosti na chemickém složení litiny, které jsou uvedeny v příloze č. 2 a č. 3. Pro upřesnění nedokonalého efektu očkování litiny s lupínkovým grafitem byly vybrané odlitky skříní elektromotorů rozřezány a na odebraných vzorcích bylo sledováno rozložení grafitu, které je také pro správně očkovanou litinu typické (jemné, pravidelné vyloučení grafitu – označení typu A).

3.3.1 Metalografické hodnocení rozložení grafitu skříně elektromotoru

Vzorky pro metalografické pozorování, resp. sledování tvaru, velikosti a rozložení grafitu, byly připraveny běžným metalografickým způsobem (broušeny a leštěny). Pozorování bylo provedeno na světelném mikroskopu Neophot 21 (Karl Zeiss Jena – SRN). Sledování grafitu bylo provedeno na vzorcích v neleptaném stavu při 100 násobném zvětšení. Získané struktury grafitu jsou uvedeny na obr. 3 – 7 až 3 – 14. Tvar, velikost a rozložení grafitu bylo hodnoceno dle ČSN 42 0461. Z uvedených obr. 3 - 7 až 3 – 13 je patrné, že grafit je lupínkový, tj. označení I. Velikost grafitu se pohybuje dle značení 5 až 6, tj. od 30 do 120 μm . Rozložení grafitu je typu C, tj. smíšené. Na obr. 3 – 14 není téměř patrný lupínkový grafit, naopak struktura více odpovídá tuhnutí litiny dle metastabilní rovnováhy. Tento obrázek potvrdil nutnost zvýšit efektivnost způsobu očkování.



Neleptáno

100 x

Obr. 3 – 7 Tvar, velikost a rozložení grafitu v litině s lupínkovým grafitem
v odlitku skříně elektromotoru (odlíváno 10.3. 2005)



Neleptáno

100 x

Obr. 3 – 8 Tvar, velikost a rozložení grafitu v litině s lupínkovým grafitem
v odlitku skříně elektromotoru (odlíváno 20.4. 2005)



Neleptáno

100 x

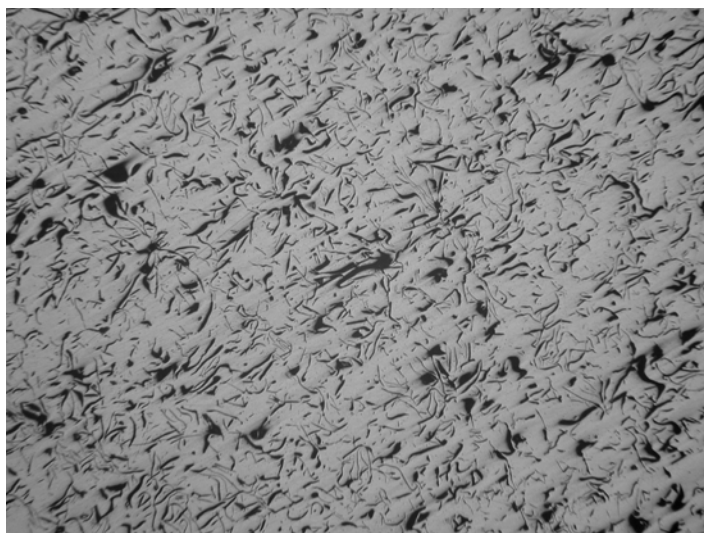
Obr. 3 – 9 Tvar, velikost a rozložení grafitu v litině s lupínkovým grafitem
v odlitku skříně elektromotoru (odlíváno 20.5.2005)



Neleptáno

100 x

Obr. 3 – 10 Tvar, velikost a rozložení grafitu v litině s lupínkovým grafitem v odlitku skříně elektromotoru (odléváno 20.6. 2005)



Neleptáno

100 x

Obr. 3 – 11 Tvar, velikost a rozložení grafitu v litině s lupínkovým grafitem v odlitku skříně elektromotoru (odléváno 21.7. 2005)



Neleptáno

100 x

Obr. 3 – 12 Tvar, velikost a rozložení grafitu v litině s lupínkovým grafitem

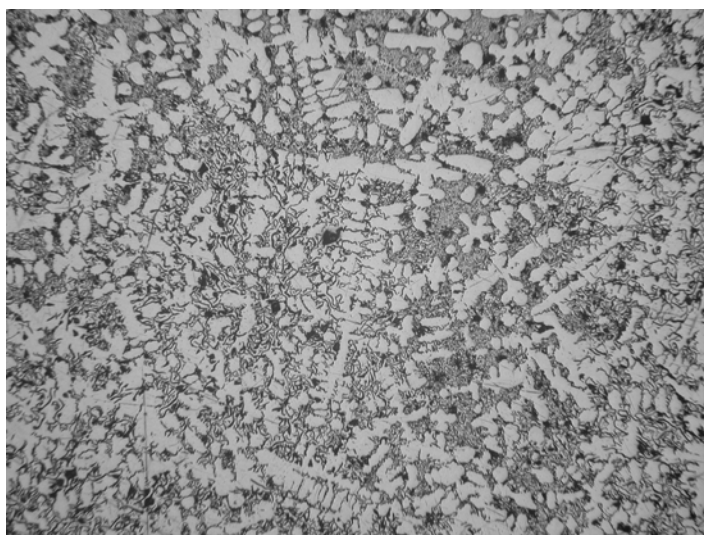
v odlitku skříně elektromotoru (odlíváno 15.8. 2005)



Neleptáno

100 x

Obr. 3 – 13 Tvar, velikost a rozložení grafitu v litině s lupínkovým grafitem
v odlitku skříně elektromotoru (odlíváno 5.9. 2005)



Neleptáno

100 x

Obr. 3 – 14 Tvar, velikost a rozložení grafitu v litině s lupínkovým grafitem

v odlitku skříně elektromotoru (odlíváno 14.12. 2005)

3.4 Návrh a provádění experimentů se změnou očkovadla

Při sériové výrobě odlitků není vhodné provádět změnu očkovadla, proto z tohoto důvodu bylo navrženo tuto změnu ověřit nejdříve na zkušebních odlitcích. K tomuto účelu byly navrženy zkušební odlitky ve tvaru tenkých destiček s různou tloušťkou stěny. Tyto destičky byly odlévány bez nálitků. Odlévání se provádělo do formy z jednotné bentonitové formovací směsi, která se používá standardně pro výrobu forem v slévárně Ferex – castings, s.r.o. Výsledkem experimentů bylo ověření účinku očkovacích tělísek Optigran, viz obr. 3 - 15, které byly před odléváním vkládány do dutiny formy. Tím byla odstraněna příčina vyčerpání očkovacího efektu při setrvávání taveniny v indukčním předpecí realistic ABE ještě před odléváním taveniny do formy. Tyto experimenty byly z důvodu statistického zpracování prováděny průběžně v období od března 2007 do března 2008.

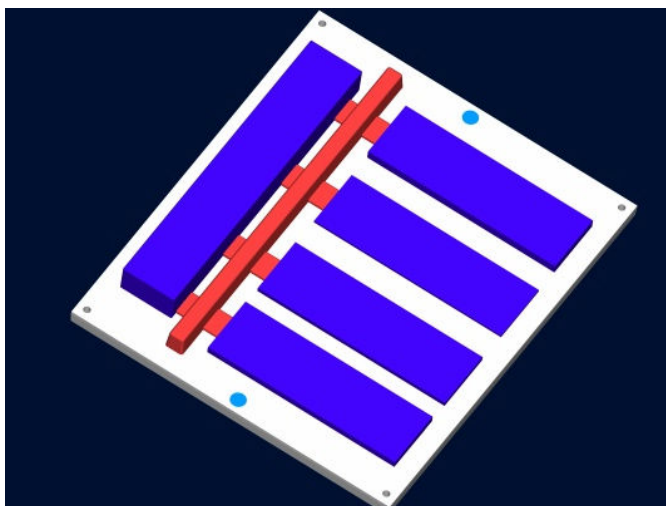
Na obr. 3 – 16 je uvedeno schéma modelového zařízení pro výrobu zkušebních destiček. Z obrázku je vidět 5 destiček. Čtyři destičky vedle sebe měly rozměry 400 x 120 mm. Tloušťky destiček byly různé. Destičky zleva měly tyto tloušťky: 15, 10, 5, 20 mm. Podélná destička byla připojena pouze z důvodu využití taveniny. Současně s odléváními destičkami byly odlévány i zkušební tyče Ø 30 mm.



Obr. 3 – 15 Očkovadlo Optigran

Chemické složení taveniny litiny pro výrobu destiček bylo sledováno na zařízení LECO. Tavba prováděná při výrobě destiček 9.12 2007 byla prováděna za stejných podmínek výše uvedené vsázky, chemické složení bylo: 3,4 % C; 0,6 % Mn; 1,8 % Si; 0,152 % P; 0,17 % S; 0,26 % Cr; 0,01% Ni; 0,4 % Cu; CE: 3,93, střední tvrdost 235 HB, mez pevnosti v tahu $R_m = 296$ MPa. Odpovídající struktura grafitu je na obr. 3 – 17.

Tavba prováděná při výrobě destiček 9.3 2008 byla prováděna za stejných podmínek výše uvedené vsázky, chemické složení bylo: 3,35 % C; 0,7 % Mn; 1,82 % Si; 0,14 % P; 0,11 % S; 0,09 % Cr; 0,009 % Ni; 0,06 % Cu; CE: 4,01, střední tvrdost 223 HB, mez pevnosti v tahu $R_m = 278$ MPa. Odpovídající struktura grafitu je na obr. 3 – 17.



Obr. 3 – 16 Schéma modelového zařízení

Celkem bylo provedeno odlití 12 taveb a u získaných odlitků byla sledována struktura a mechanické vlastnosti. Na obr. 3 – 17 a 3 – 18 je uvedena struktura grafitu po naočkování taveniny tuhým blokem Optigranu.



Neleptáno

100 x

Obr. 3 – 17 Tvar, velikost a rozložení grafitu v litině s lupínkovým grafitem
v odlitku destičky tloušťky 5 mm



Neleptáno

100 x

Obr. 3 – 18 Tvar, velikost a rozložení grafitu v litině s lupínkovým grafitem
v odlitku zkušební destičky tloušťky 10 mm

Tyto ověřovací metody potvrdily vhodnost použití očkovacích bloků Optigran pro přípravu a metalurgii taveniny pro výrobu většího sortimentu odlitků ve slévárně Ferex-castings s.r.o. Liberec. V současné době je toto očkovadlo zařazeno do výroby litiny s lupínkovým grafitem. První tavby prokázaly pokles zmetkovitosti. Současné technické nesnáze při výrobě odlitků v této slévárně zatím nedovolily větší rozsah prováděných zkoušek s tímto očkovadlem.

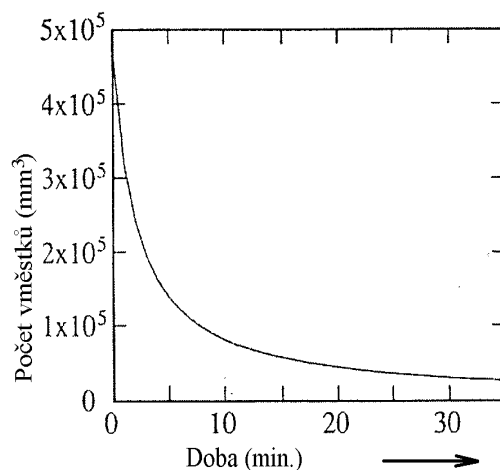
4. DISKUSE VÝSLEDKŮ

Výsledky obsažené v této práci předkládají dílčí informace a současně i nesnáze s výrobou litiny s lupínkovým grafitem ve slévárně Ferex - castings s.r.o. Liberec – Ostašov. Hlavní problémy spočívají v efektivním průběhu očkovacího procesu, který spočívá v tom, že litina je vyráběna ve studenovětrné kuplovně s plynovým předpecím ze kterého je tavenina litiny přelévána do transportní pánve. Při přelévání do transportní pánve byla tavenina očkovaná očkovačem Superseed o hmotnosti 3 kg (tj. 0,2 hmotnostních % vsázky) se zrnitostí 3 až 6 mm. Z transportní pánve byla ještě tavenina přelévána do indukčního předpecí ze kterého byla tavenina strojně odlévána do forem. Setrvání taveniny v indukčním předpecí vedlo k vyčerpání očkovacího efektu a vyrobené odlitky nevykazovaly odpovídající strukturu a mechanické vlastnosti. Tento praktikovaný postup výroby odlitků v takto renomované slévárně je celkem překvapivý. Je obecně známo, že očkování je nedílnou součástí procesu výroby jakostních druhů litinových odlitků. Očkováním se optimalizuje struktura a vlastnosti litiny s důrazem na jejich vysokou kvalitu. Nedostatek grafitizačních zárodků v tavenině krystalizující litiny je příčinou podchlazení při eutektickém tuhnutí za vzniku nevhodně vyloučeného grafitu, případně podchlazení pod metastabilní eutektickou teplotu za tvorby karbidů. Nebezpečí tuhnutí litiny podle metastabilní rovnováhy roste s klesajícím stupněm eutektičnosti Sc a se zvyšující se rychlostí ochlazování. To je zejména u tenkostěnných litinových odlitků s vyšší pevností.

Pro zabránění vzniku těchto nežádoucích jevů se používá očkování taveniny. Očkování podporuje vznik krystalizačních zárodků grafitu. Účinnost očkovačů k tvorbě zárodků časem odeznívá, proto se provádí krátce před odlitím nebo v průběhu lití do formy.

Očkování se vždy provádí s ohledem na tloušťku stěny a charakter formy. Účinnost očkování je maximální ihned po přidání očkovače do taveniny a odeznívá s časem. Rychlost odeznívání je závislá na: složení očkovače, kvalitě litiny a způsobu očkování, teplotě taveniny, povrchové energii a difúzních podmínkách očkovacího procesu.

Odezňování očkovacího účinku může být velmi rychlé. Může se ztratit během několika prvních minut po přidání očkovačla. Odezňování očkovacího účinku se vysvětluje chemickými reakcemi a rozpouštěním zárodků. Z tohoto důvodu se celkové množství aktivních zárodků snižuje. Jejich chování je ve shodě s experimentálním pozorováním, jak je patrné z následujícího obrázku:



Obr.4 – 1 Schéma závislosti počtu krystalizačních zárodků (resp. vměstků) na čase

Je nutné zdůraznit, že hlavní projevy odezňování účinku očkování jsou:

1. Zvýšené podchlazení při eutektickém tuhnutí a větší sklon k tvorbě zákalky v LLG a LGG, zvláště v tenkých průřezích.
2. Snížení počtu eutektických buněk v LLG, které má za následek zhoršení mechanických vlastností.

Ihned po naočkování nastává vždy snižování očkovacího účinku. Maximálního efektu dosáhneme budeme-li odlévat ihned po naočkování. Z pohledu odezňování očkovacího účinku je ideální očkovat do vtokové jamky. V závislosti na chemickém složení a podmínkách očkování a velikosti očkovačla mají různá očkovačla rozdílnou dobu odezňování. Současně je nutno připomenout, že je důležitá teplota očkování, která by měla být při výrobě litiny s lupínkovým grafitem minimálně 1360 °C. Současně též nesmí být očkovačlo vlhké, zoxidované, atd.

V případě postupu přípravy taveniny ve slévárně Ferex - castings je velmi důležitá velikost očkovačla, tak aby nedošlo předčasně k jeho tzv. vyhoření. Proto volba vkládání tuhého bloku očkovačla Optigran do dutiny formy je v tomto směru velmi příznivá. Chemické složení očkovačla Optigran je 70 až 78 % Si; 0,8 až 1,8 % Al; 0,3 až 1,4 % Ca; 3,5 až 4,5 % Mn. Doba rozpouštění bloku je dle výrobce je 45 s. Také

struktura zkušebních destiček a sledování mechanických vlastností přilitých tyčí potvrdily vhodnost použití tohoto očkovadla.

5. ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo získat, zpracovat a následně pomocí experimentálních měření ověřit poznatky výroby tenkostěnných odlitků z litiny s lupínkovým grafitem ve slévárně Ferex – castings s.r.o., Liberec.

Diplomová práce je rozdělena do dvou částí - rešeršní a experimentální. První část obsahuje shrnutí stávajících poznatků o nukleaci, krystalizaci lupínkového grafitu a výrobě litiny s lupínkovým grafitem. Dále obsahuje zhodnocení mechanických a technologických vlastností litiny s lupínkovým grafitem pro využití ve slévárenské praxi.

V druhé části se tato diplomová práce zabývá experimentálním zjišťováním mechanických vlastností litiny s lupínkovým grafitem pro jednotlivé tloušťky odlitku a metalografickou kontrolou struktury odlitku. Byla provedena řada experimentů od přípravy taveniny, přes odlévání tenkostěnných odlitků o tloušťkách 5, 10, 15 a 20 mm, až po sledování mechanických vlastností odlitků z litiny s lupínkovým grafitem v závislosti na chemickém složení taveniny. Tyto závislosti byly zjištěny měřením tvrdosti a pevnosti v tahu.

Experimenty předkládané v této diplomové práci přináší několik dílčích závěrů:

- 1) Bylo ověřeno, že problém v kvalitě tenkostěnných odlitků skříní elektromotorů spočívá v nastaveném technologickém postupu úpravy a odlévání taveniny litiny do forem. Pro řešení výše popsaného problému byla navržena úprava taveniny litiny očkovaním až v dutině formy s použitím očkovadla Optigran.
- 2) Volba rozsahu odlévání tloušťek zkušebních destiček 5, 10, 15 a 20 mm pro hledání optimálního chemického složení v závislosti na tloušťce odlitku, kdy u tloušťky 5 mm již není problém získat homogenní strukturu a jemně vyloučený rovnoměrně rozložený grafit typu A, se ukázala jako správná.
- 3) Dle naměřených výsledků lze sledovat značnou problematičnost výroby jakostních tenkostěnných odlitků z litiny s lupínkovým grafitem.
- 4) Jako nejvhodnější řešení pro získání rovnoměrně rozloženého grafitu v tenkých stěnách odlitku se ukázalo použití komplexního očkovadla Optigran. Kdy tuhé bloky

očkovačla vkládané přímo do dutiny formy zabraňují vyčerpání očkovačho efektu a vzniku zákalky.

- 5) V neposlední řadě je velmi důležité správně navrhnout složení vsázkových surovin, dodržet technologický průběh tavby a očkovač, včetně přesného dodržení předepsaných teplot očkovač a odlěvač.

Hodnocené mechanické vlastnosti byly mez pevnosti v tahu R_m a tvrdost podle Brinella HB na tyčích průměru 30 mm. Získané hodnoty jsou uspořádány do tabulek a grafů uvedených v příloze. Výsledkem zkoumání je porovnač naměřených a vypočtených hodnot.

6. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Nová, I.: Teorie slévání II, Teoretické základy metalurgie slévárenských slitin. Skripta, TU Liberec, 2007.
- [2] Roučka, J.: Metalurgie litin. [Skripta], VUT Brno, 1998.
- [3] Vondrák, V.: Metalurgie litin – 3.část, VŠB Ostrava, 1978.
- [4] Pluhař, J.: Nauka o materiálech, SNTL Praha, 1989.
- [5] Kolektiv katedry: Metalurgie slévárenských slitin, ČVUT Praha, 1973.
- [6] Masaryk, P.:Príspevok k štúdiu kinetiky a mechanizmu eutektickej reakcie grafitických liatin.,Žilina: VŠDS, 1990.
- [7] Hanemann, H.: Atlas Metallographikus, Berlin, 1936.
- [8] Vondrák,V. :Sekundární metalurgie litin, Ostrava: VŠB v Ostravě, 1992.
- [9] Exner, J.,Čech, J.:Hodnocení vlastnosti litin podle tahových deformačních charakteristik, Slévárenská ročenka, 1993.
- [10] Skočovský, P. - Matejka, M.: Mikrostruktúra liatin - metalografická príručka. Fompex Trenčín - ES VŠDS, 1994.
- [11] Technická informace firmy Elkem a.s., č.1 až 5